ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2025 Том 15 № 4 (60)

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ)

Главный редактор
д.т.н., проф. М.В. Драпалюк
Заместитель главного редактора
д.г.н., проф. Н.В. Яковенко
Состав редакционной коллегии
д.с.-х.н., проф., академик РАН Н.Н. Дубенок (Россия)
д.с.-х.н., гл. н.с., академик РАН К.Н. Кулик (Россия)
д.с.-х.н., проф., академик РАН А.А. Мартынюк (Россия)
д.б.н., проф. Замолодчиков Д.Г. (Россия)
д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)
д.т.н., проф. Е.В. Агеев (Россия)
д.т.н., проф. Л.И. Бельчинская (Россия)
д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Матвеев (Россия)
д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)
д.б.н., проф. А.А. Гусев (Россия)
к.б.н., проф. К.В. Крутовский (Россия, Германия)
д.э.н, проф.С.С. Морковина (Россия)
д-р наук И. Ремеш (Чехия)
д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)
д.т.н., проф. В.А. Зеликов (Россия)
д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)
д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)
д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)
д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)
д.т.н., проф. В.С. Сюнёв (Россия)
д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)
д-р наук, ст. науч. сотрудник Клиссия Барбоза Мастранджело (Бразилия)
д-р наук, проф. П. Тылек (Польша)
д-р наук С.В. Ребко (Беларусь)
проф. Дингуо Чжоу (КНР)
д-р наук, проф. А. Маркомини (Италия)
д-р наук, проф. В. Подразски (Чехия)
д-р наук, проф. Н. Билир (Турция)
д-р наук, проф. Я. Седлячик (Словакия)
д-р наукМ. Ахмади-Афзади (Иран)
д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)
д-р наук, проф. Кью-Сак Кэнг (Республика Корея)
д-р наук А. Монтагноли (Италия)
д-р наук Янг Пэнг (КНР)
д-р наук, проф. З. Говедар (Босния и Герцеговина)
д-р наук, проф. А. Хэлуфи (Алжир)
д-р наук, проф. К. Палагиану (Румыния)

Технический секретарь
С.Ю. Крохотина
Компьютерная верстка
С.Ю. Крохотина

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-66384 от 14.07.2016 г.

Материалы настоящего журнала могут быть воспроизведены только с письменного разрешения редакционной коллегии

РИО ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8
телефон (473) 253-72-90
факс (473) 253-76-51
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2025

FORESTRY ENGINEERING JOURNAL

Scientific Journal
2025 Vol. 15 № 4 (60)
Founder – Federal State Budget Educational Institution of High Education
«Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov» (VSUFT)

Editor-in-Chief
Dr., Prof. M.V. Drapalyuk
Deputy Editor-in-Chief
Dr., Prof. N.V. Yakovenko

Members of Editorial Board
Dr., Prof., RAS Academician N.N. Dubenok (Russia)
Dr., Prof., RAS Academician K.N. Kulik (Russia)
Dr., Prof. RAS Academician A.A. Martynyuk (Russia)
Dr., Prof. D.G. Zamolodchikov (Russia)
Dr., Prof. D.N. Afonichev (Russia)
Dr., Prof. E.V. Ageev (Russia)
Dr., Prof. L.I. Belchinskaya (Russia)
Dr., Prof. N.N. Matveev (Russia)
Dr., Prof. S.M. Matveev (Russia)
Dr., Prof. A.A. Gusev (Russia)
Dr0., Prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)
Dr., Prof. S.S. Morkovina (Russia)
Dr. J. Remeš (Czech Republic)
Dr., Prof. V.A. Zelikov (Russia)
Dr., Prof. A.M. Tsypuk (Russia)
Dr., Prof. P. Tylek (Poland)
Dr., Prof. O.N. Burmistrova (Russia)
Dr., Prof. I.V. Grigoriev (Russia)
Dr., Prof. A.S. Manaenkov (Russia)
Dr., Prof. V.V. Rubtsov (Russia)
Dr., Prof. V.S. Syunev (Russia)
Dr., Prof. N.N. Kharchenko (Russia)
Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)
Dr. S.V. Rabko (Belarus)
Prof. Zhou Dingguo (PRC)
Dr., prof. A. Marcomini (Italy)
Dr., Prof. V. Podrazsky (Czech Republic)
Dr., Prof. N. Bilir (Turkey)
Dr., Prof. J. Sedliačik (Slovakia)
Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)
Dr., Prof. V. Ivetić (Serbia)
Dr., Prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)
Dr. A. Montagnoli (Italy)
Dr. Yong Pang (PRC)
Dr., Prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)
Dr., Prof. A. Kheloufi (Algeria)
Dr., Prof. C. Palaghianu (Romania)

Technical Secretary
S.Yu. Krokhotina
Typesetting
S.Yu. Krokhotina

The journal is registered by
the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology
and Communications

Registration certificate
PI № FS77-66384 of 14.07.2016

Materials of this journal may be reproduced only with
written permission of the editorial board

EPD FSBEI HE «VSUFT»
394087, Voronezh, Timiryazev str., 8,
Phone: +7(473) 253-72-90,
Fax: +7(473) 253-76-51,
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

Алаева Л.А., Девятова Т.А., Негробова Е.А., Бочаров П.П.
Экологические особенности и ресурсный потенциал лесных подстилок дубрав Доно-Воронежского водораздела 7
Богданов А.П., Ильинцев А.С., Третьяков С.В., Коптев С.В.
Оценка лесоводственной эффективности проходных рубок в северотаежном лесном районе 23
Грибачева О.В., Гаврилюк Ю.В., Копец Ю.В.
Влияние густоты древостоя и освещенности на естественное возобновление в полезащитных лесополосах Луганской Народной Республики 39
Евдокимова Л.С., Татаринцев А.И., Зленко Л.В., Полонская Л.А.
Оценка естественного возобновления в рекреационных сосняках западной части лесопаркового зеленого пояса г. Красноярска 58
Евлаков П.М., Цепляев А.Н., Попова А.А., Рязанцева О.С.
Влияние типов кассет и контейнеров на биологическую продуктивность посадочного материала гибрида *Populus alba* L. x *Populus tremula* L. 77
Иванов А.А., Коптев С.В.
Определение закономерных связей таксационных показателей с применением данных дистанционного зондирования Земли на примере сосновых древостоев Новгородской области 95
Исаков И.Ю., Шестибратов К.А.
Феногенетический анализ стабильности развития вегетативных органов берёзы повислой и березы пушистой 109
Лебедев А.В.
Современное состояние зеленых насаждений Кологривского зоотехнического техникума (Костромская область) 125
Лисицын В.И., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С.
Сравнительный анализ хвойных древостоев регионов Северной Евразии в рамках эколого-физиологической модели 146

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

Alaeva L.A., Deviatova T.A., Negrobova E.A., Bocharov P.P.
Ecological Features and Resource Potential of Oak Forest Litter in the Don–Voronezh Watershed 7
Bogdanov A.P., Ilyintsev A.S., Tretyakov S.V., Koptev S.V.
Assessment of the silvicultural efficiency of thinning cuttings in the northern taiga forest region 23
Gribacheva O.V., Gavriluk Yu.V., Kopets Yu.V.
Influence of tree growth density and illumination on natural regeneration in protective forest belt of the Lugan People's Republic 39
Evdokimova L.S., Tatarintsev A.I., Zlenko L.V., Polonskaya L.A.
Assessment of natural regeneration in recreational pine forests in the western part of the forest park green belt in Krasnoyarsk 58
Evlakov P.M., Tseplyaev A.N., Popova A.A., Ryazantseva O.S.
The influence of types of cassettes and containers on the biological productivity of the planting material of the hybrid *Populus alba L. x Populus tremula L.* 77
Ivanov A.A., Koptev S.V.
Determination of natural connections of taxation parameters using remote sensing data on the example of pine stands in the Novgorod region 95
Isakov I. Yu., Shestibratov K. A.
Stability of development and phenogenetic analysis of development in silver birch and downy birch 109
Lebedev A.V.
Current state of green spaces of the Kologriv zootechnical technical school (Kostroma region) 125
Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Evsikova N.Yu., Kamalova N.S.
Comparative analysis of the Northern Eurasia regions coniferous forest stands within the framework of the ecological-physiological model 146

Манаенков А.С., Андреев С.Ю., Ульянов М.А.
Особенности роста и культивирования насаждений *QUERCUS ROBUR* L. на песках северо-восточного Предкавказья 162
Мельник А.И., Вайс А.А., Михайлов П.В., Селиванов В.В.
Временные закономерности горимости лесов, нарушенных энтомовредителями, на территории подтаёжной зоны Средней Сибири 180
Павлюк Н.А., Павлюк Е.А.
Развитие проростков *Quercus robur* L. на ранних этапах онтогенеза 202
Попова А.А., Евлаков П.М., Попова В.Т., Рыжкова В.С., Нартова И.М., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А.
Влияние засухи на интенсивность видимого фотосинтеза и водный режим ювенильных растений генотипов дуба черешчатого, березы повислой и березы пушистой в контролируемых условиях открытого грунта 215
Попова А.А., Гродецкая Т.А., Видягина Е.О., Лебедев В.Г.
Изменения в экспрессии генов у чувствительного к засухе генотипа *Quercus robur* под воздействием стресса дефицита влаги 234
Поташкина Ю.Н., Кошелев А.В., Веденеева В.А., Шатровская М.О.
Фракционный состав фитомассы и годичная продукция сосны обыкновенной (Pinus sylvestris) в условиях сухостепной зоны каштановых почв 256
Славский В.А., Литовченко Д.А.
Динамика древесного опада в лесостепной зоне Воронежской области 276
Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А.
Анатомо-морфологические и биохимические показатели *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал) 294
Штепа Е.Н.
Продуктивность и санитарное состояние дубрав предгорий Северного Кавказа (на примере Республики Адыгея) 310

Manaenkov A.S., Andreev S.Yu., Ulianov M.A.
Peculiarities of growth and cultivation of plantations of *QUERCUS ROBUR* L. on the sands of the north-eastern Pre-Caucasian region 162
Melnik A.I., Vais A.A., Mikhailov P.V., Selivanov V.V.
Temporal patterns of wildfire occurence in forests disturbed by pests in the subtaiga zone of Central Siberia 180
Pavlyuk N.A., Pavlyuk E.A.
Development of seedlings of *Quercus robur* L. in the early stages of ontogenesis 202
Popova A.A., Evlakov P.M., Popova V.T., Ryzhkova V.S., Nartova I.M., Lebedev V.G., Shestibratov K.A.
The effect of drought on the intensity of visible photosynthesis and the water regime of juvenile plants of the genotypes of Quaking Oak, Downy Birch and Downy White Birch under controlled conditions in open ground 215
Popova A.A., Grodetskaya T.A., Vidyagina E.O., Lebedev V.G.
Changes in gene expression in the drought-sensitive genotype *Quercus robur* under moisture stress 234
Potashkina Yu.N., Koshelev A.V., Vedeneyeva V.A., Shatrovskaya M.O.
Fractional composition of phytomass and annual production of Scots pine (Pinus sylvestris) under the conditions of the dry steppe zone of chestnut soils 256
Slavskiy V.A., Litovchenko D.A.
Dynamics of tree litter in the forest-steppe zone of the Voronezh region 276
Chukina N.V., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A.
Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Picea obovata* Ledeb. in Plantings on a Dredge Dump After Gold Mining (Middle Urals) 294
Shtepa E.N.
Productivity and Sanitary Condition of Oak Forests in the Foothills of the North Caucasus (Case Study of the Republic of Adygea Forests) 310

ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Дорошенко А.В., Бережная М.В., Томина Е.В.
Композитный материал с высокой адсорбционно-каталитической активностью на основе биоугля из опилок березы повислой (*Betula Pendula*) 327

Стородубцева Т.Н., Черников Э.А., Шакирова О.И., Бондарев В.А.
Инновационные композиционные материалы на основе цемента, древесных отходов и полиэтилентерефталата для промышленного строительства 343

ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Васильев Д.В., Бургонутдинов А.М., Сибиряткин Е.В., Куницкая О.А.
Критический анализ теоретических моделей уплотнения грунтов и выявление их ограничений при прогнозировании предельного состояния 356

Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю., Школьных А.В., Лысыч М.Н.
Оптимизация параметров уплотняющих катков лесной сажалки для почв Центральной России на основе дискретно-элементного моделирования 368

Лысыч М.Н., Бухтояров Л.Д., Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю., Мартыновский Е.В., Брындина Л.В.
Проектирование и испытание аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА 387

Стародубов А.С., Платонов А.Д., Брындина Л.В.
Влияние геометрических параметров режущего инструмента на показатели точности при пилении ленточными пилами 405

Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рыжов Я.А., Тихонов Е.А., Перфильев П.Н., Египко С.В.
Моделирование влияния буксования движителей на устойчивость лесных машин при маневрировании на слабонесущих склонах 421

Черных А.С., Рублев И.Ю.
Математическая модель определения объемов бересты на деревообрабатывающих предприятий при организации производства композиционных материалов 437

WOOD PROCESSING. CHEMICAL TECHNOLOGIES

Doroshenko A.V., Berezhnaya M.V., Tomina E.V.
Composite material with high adsorption-catalytic activity based on biochar from sawdust of birch (*Betula Pendula)* 327

Storodubtseva T.N., Chernikov E.A., Shakirova O.I., Bondarev V.A.
Innovative composite materials based on cement, wood waste and polyethylene terephthalate for industrial construction 343

TECHNOLOGIES. MACHINERY AND EQUIPMENT

Vasiliev D.V., Burgonutdinov A.M., Sibiryatkin E.V., Kunitskaya O.A.
Critical Analysis of Theoretical Models of Soil Compaction and Identification of Their Limitations in Predicting the Ultimate State 356

Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Shkolnykh A.V., Lysych M.N.
Optimization of the parameters of compacting rollers of the forest planter for soils of Central Russia based on discrete-element modelling 368

Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Martynovsky E.V., Bryndina L.V.
Design and testing of a precision seeding device for aerial sowing of pelleted forest seeds from a UAV 387

Starodubov A.S., Platonov A.D., Bryndina L.V.
The influence of geometric parameters of the cutting tool on the accuracy indicators when sawing with band saws 405

Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Ryzhov Ya.A., Tikhonov E.A., Perfiliev P.N., Egypko S.V.
Modeling of the effect of sliding propellers on the stability of forest vehicles when maneuvering on low-bearing slopes 421

Chernykh A.S., Rublev I.Y.
Mathematical model for determining the volume of birch bark at woodworking enterprises when organizing the production of composite materials 437

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Константинов А.В., Бурцев Д.С., Гаврилюк Е.С., Королева Т.С., Торшукова З.А.
Динамика количественного распределения видов адаптационных мероприятий и затрат на их проведение в лесах России в условиях изменений климата 456

Терёшина М.В., Яковлева Е.А., Яковенко Н.В.
Циркулярное агролесоводство как основа трансформации агроэкосистем Краснодарского края 473

ЭКОЛОГИЯ

Захарова О.В., Федорова О.А., Григорьев Г.В., Гусев А.А.
Гранулированный доменный шлак стимулирует рост саженцев березы пушистой в условиях закисленного почвенного субстрата 493

Яковенко Н.В., Старухина Е.А., Варгузина М.Г., Нацентова Е.А., Волошина О.В.
Экосистемные услуги лесов: системный анализ концепции, современной критики и подходов к оценке 509

NATURE MANAGEMENT

Konstantinov A.V., Burtcev D.S., Gavrilyuk E.S., Koroleva T.S., Torshukova Z.A.
Dynamics of quantitative distribution of types of adaptation measures and costs for their implementation in Russian forests under climate change conditions 456

Tereshina M.V., Yakovleva E.A., Yakovenko N.V.
Circular agroforestry as a basis for transformation of agroecosystems of Krasnodar Region 473

ECOLOGY

Zakharova O.V., Fedorova O.A., Grigoriev G.V., Gusev A.A.
Granulated blast furnace slag stimulates the growth of downy birch seedlings in acidified soil conditions 493

Yakovenko N.V., Starukhina E.A., Gagikovna V.M., Natsentova E.A., Voloshina O.V.
Ecosystem services of forests: a systematic analysis of the concept, contemporary criticism and assessment approaches 509

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/1
УДК 630*114.351:630*113

Экологические особенности и ресурсный потенциал лесных подстилок дубрав Доно-Воронежского водораздела

Лилия А. Алаева[1]✉, liliya-250477@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-3187-6790
Татьяна А. Девятова[1], devyatova@bio.vsu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8722-1126
Елена А. Негробова[1], elena-negrobova@yandex.ru, https://orcid.org/0009- 0002-5304-2186
Павел П. Бочаров[2], pashaboch@gmail.com, https://orcid.org/0009- 0007-0416-0668

[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация
[2]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Исследование посвящено изучению специфических особенностей подстилкообразования под дубравами разных типов местности Доно-Воронежского водораздела. Полевые работы были начаты весной 2025 года, в ходе которых была заложена ландшафтная катена из шести пробных площадок (ПП) под дубравами: ПП 2 (190 м), останцово-водораздельный тип местности (ТМ), водораздел Ведуга-Дон; ПП 1 (118 м), надпойменно-террасовый ТМ, нижняя надпойменная терраса р. Дон; ПП 3 (160 м), надпойменно-террасовый ТМ, IV терраса р. Дон; ПП 6 (160 м), склоновый ТМ, коренной склон р. Воронеж, ПП 4 (90 м), пойменный ТМ, центральная пойма р. Воронеж; ПП 5 (114 м), надпойменно-террасовый ТМ, II НПТ р. Усманка. По всем точкам в начале вегетационного периода были отобраны образцы лесных подстилок и измерена их мощность, определены влажность, плотность, фракционный состав и рассчитаны запасы лесных подстилок (в т/га). Полученные данные позволили отнести лесные подстилки всех исследованных дубрав к деструктивным примитивным очень маломощным лиственным. Результаты полевых и лабораторных исследований обрабатывались с использованием корреляционно-регрессионного анализа, что позволило оценить взаимосвязи между физическими свойствами лесных подстилок и их запасами. Установлена наиболее тесная прямая связь между запасами лесной подстилки и ее плотностью (R^2 = 0.8539). Анализ фракционного состава лесных подстилок весеннего отбора показал, что в их составе количественно преобладают активные фракции, состоящие из листьев и травянистых остатков. Наибольший интерес представляют выявленные закономерности в различиях степени выраженности деструктивных процессов и, соответственно, быстроте возврата продуктов разложения лесных подстилок в биологический круговорот дубрав разных типов местности. По этому показателю их можно расположить в порядке убывания в следующий вариационный ряд: пойменные дубравы > надпойменно-террасовые дубравы > плакорные дубравы > склоновые (приречные) дубравы Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования их как для фундаментальных исследований (биологический круговорот биофильных элементов), так и для научно-практических работ (ресурсный потенциал запасов мертвой органики лесных подстилок дубрав лесостепи).

Ключевые слова: *дубрава, лесная подстилка и ее фракционный состав, мощность, запас, ресурсный потенциал, Доно-Воронежский водораздел, лесное почвообразование*

Благодарности: коллектив авторов благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: коллектив авторов заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Алаева Л.А., Девятова Т.А., Негробова Е.А., Бочаров П.П. Экологические особенности и ресурсный потенциал лесных подстилок дубрав Доно-Воронежского водораздела // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 7-22. – Библиогр.: с. 18-22 (29 назв.). – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/1.

Поступила 23.10.2025. ***Пересмотрена*** 28.11.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Ecological Features and Resource Potential of Oak Forest Litter in the Don–Voronezh Watershed

Liliia A. Alaeva [1]✉, liliya-250477@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-3187-6790
Tatiana A. Deviatova [1], devyatova@bio.vsu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8722-1126
Elena A. Negrobova [1], elena-negrobova@yandex.ru, https://orcid.org/0009- 0002-5304-2186
Pavel P. Bocharov [2], pashaboch@gmail.com, https://orcid.org/0009- 0007-0416-0668

[1]Voronezh State University, 1, Universitetskaya square, Voronezh, 394018, Russian Federation
[2]Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev Street, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

This study examines the specific features of litter formation in oak forests located on different terrain types within the Don–Voronezh watershed. Field work began in the spring of 2025. A landscape catena of six test sites (TS) in oak forests was established: **TS 2** (ALT = 190 m), outlier-watershed types of terrain (TT), Veduga-Don Watershed; **TS 1** (118 m), above-floodplain-terraced TT, Don River lower terrace; **TS 3** (160 m), above-floodplain-terraced TM, 4th Don River terrace; **TS 6** (160 m), slope TT, Voronezh River slope; **TS 4** (90 m), floodplain TT, central floodplain in the Voronezh River; and **TS 5** (114 m), above-floodplain-terraced TT, 2nd terrace of the Usmanka River. At the beginning of the growing season, forest litter samples were collected at all test sites. At the beginning of the growing season, forest litter samples were collected at all test sites. Litter thickness was measured, and its moisture content, bulk density, and fractional composition were determined, after which forest litter stocks (t/ha) were calculated. The obtained data made it possible to classify the forest floor in all the studied oak forests as destructive-primitive, very low-power deciduous. The results of field and laboratory studies were processed using correlation and regression analyses, which made it possible to assess the relationships between the physical properties of the forest litter and their reserves. The strongest direct relationship was found between forest litter reserves and bulk density (R^2 = 0,8539). Analysis of the fractional composition of the spring forest litter samples showed that the active fractions, consisting mainly of leaves and herbaceous residues, quantitively dominated the litter. Of the greatest interest are the identified patterns in the differences in the intensity of destructive processes and, consequently, in the rate at which forest litter decomposition products are returned to the biological cycle of oak forests on different terrain types. According to this indicator, the oak forests can be arranged in descending order in the following variation series: Floodplain oak forests > Above-floodplain-terraced oak forests > Flat interfluve oak forests > Slope (riverine) oak forests. The practical significance of the results lies in their applicability both

to fundamental research (on the biological cycle of biophilic elements) and to scientific and practical work (assessing the resource potential of dead organic matter reserves in the litter of forest-steppe oak).

Keywords: oak forests, forest litter and its fractional composition, capacity, reserve, resource potential, Don-Voronezh watershed, forest soil formation.

Acknowledgments: the team of authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review of the article.
Conflict of interest: the team of authors declares that there is no conflict of interest.

For citation: Alaeva L.A., Deviatova T.A., Negrobova E.A., Bocharov P.P. (2025). Ecological Features and Resource Potential of Oak Forest Litter in the Don–Voronezh Watershed. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 4 (60), pp. 7-22 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/1.

Received 23.10.2025. ***Revised*** 28.11.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Специфика лесного почвообразования обусловлена составом, количеством мертвой органики, ритмом ее поступления на поверхность почвы, с одной стороны, и процессами деструкции и возврата продуктов разложения мертвой органики в почвообразование и биологический круговорот, с другой стороны. В случае преобладания первого процесса над вторым, на поверхности лесных почв формируется органогенный горизонт – лесная подстилка (A_0). На объемы ее накопления влияет совокупность абиотических и биотических факторов. A. Fuertes и др. (2025) [1] отмечают, что в хвойных и широколиственных лесах запасы лесной подстилки зависят от возраста деревьев, типа леса и климатических условий природной зоны. R. Canessa и др. (2021) [2] считают, что микроклиматические показатели (влажность и температура почв) имеют такое же важное значение для разложения лесной подстилки, как и ее состав, и состав древостоя. В.В. Каганов и др. (2023) [3], детально изучив влияние климата на запасы углерода фитомассы и подстилки в лесах юга Европейской России, делают вывод, что запасы углерода фитомассы имеют статистически достоверную связь с климатическими характеристиками (ГТК за май–сентябрь), при этом с изменениями среднегодовой температуры, годовых осадков и ГТК за май-сентябрь значимых зависимостей с запасами углерода фитомассы не выявлено.

Большой интерес представляют механизмы и скорость деструкции лесной подстилки, которые были детально описаны в работах Л.О. Карпачевского (19) [4], и нашли отражение в современных научных исследованиях. Stuckenberg T. и др. (2025) [5] отмечают, что на скорость разложения лесной подстилки влияют тип леса и содержание питательных элементов в почве, Shigyo N. и др. (2024) [6] считают, что уникальные взаимосвязи между растительными остатками и микробными сообществами в почвах, Fanin N. и др. (2021) [7] выделяют роль микробиоты филлосферы, Ahirwal J. и др. (2021) [8] считают, что факторы окружающей среды и типы леса предопределяют скорость и направление процессов деструкции лесных подстилок.

В современных исследованиях лесных подстилок важное значение придается биосферным функциям лесных подстилок, в том числе, их участию в круговороте биофильных элементов и формирование запасов мертвой органики в лесных экосистемах. В работах отечественных ученых Е.Н. Наквасиной и Ю.Н. Шумиловой (2021) [9], Н.Ф. Каплиной и Н.Ю. Кулаковой (2021) [10], А.Б. Александровой и др. (2023) [11], И.А. Лихановой и др. (2024) [12] представлены результаты количественных оценок запасов лесных подстилок лесов разных природных зон и запасов углерода, азота и других биофильных элементов в них.

Исследования Л.Г. Ханиной и др. (2023) [13] подтвердили, что крупные древесные остатки являются принципиально важным компонентом лесных экосистем. Описанные ими особенности элементного состава и его динамики в валеже разных видов деревьев можно использовать для оценок круговорота и прогноза изменений концентраций элементов в лесных экосистемах.

Для устойчивого функционирования лесных экосистем, особенно после антропогенного воздействия (вырубки) или природных ЧС (пожары), необходимо применять системы мероприятий по лесовосстановлению. О.Н. Бахмет и М.В. Медведева (2022) [14], рассмотрев данные по деструкции опада хвои сосны в почвах, находящихся на различных стадиях искусственного лесовосстановления (свежая вырубка, культуры сосны 7-, 15- и 40-летнего возраста) установили, что наибольшие изменения процесса трансформации органического вещества происходят в почвах, находящихся на ранних стадиях лесовосстановления. Л.Г. Богатырев и др. (2020) [15], изучив особенности динамики морфологии и химических свойств лесной подстилки в ходе постагрогенного лесовосстановления пашни в подзоне южной тайги, установили увеличение запасов, а также разнообразие строения и степени пространственного варьирования основных морфологических показателей подстилки по мере возобновления древостоя. И.В. Зенкова и И.М. Штабровская (2022) [16] в своих исследованиях подстилочной фауны на вырубках подтвердили важность лесной подстилки для сохранения на горно-лесных вырубках и гарях исходного комплекса фауны и поддержания гидротермического режима, благоприятного для ее восстановления.

Лесная подстилка при этом может выступать индикатором процессов возобновления. Так, после глобального мета-анализа Latterini F. и др. (2023) [17] установили, что для лесовосстановления преобладающим фактором является изменение условий освещения и связанной с этим температуры почвы, что приводит к положительной корреляции между процентом удаления биомассы и скоростью разложения подстилки. О.В. Семенюк и др. (2022) [18] считают, что лесная подстилка выступает индикатором интенсивности биологического круговорота веществ в городских лесах, где высокая степень рекреационной нагрузки.

Результатом совокупного взаимодействия всех абиотических и биотических факторов по образованию растительного опада, его трансформации и деструкции является лесная подстилка, которая характеризуется набором специфических свойств для каждой растительной формации. Особенности формирования лесных подстилок, их мощности, фракционного состава, химического состав находят отражение в работах А.В. Исаева и Ю.П. Демакова (2023) [19], Н.В. Малышевой и др. (2025) [20], И.В. Голядкиной и др. (2025) [21].

Вариабельность процессов подстилкообразования под различными биоценозами в разных природных зонах предопределила необходимость их классифицировать. В настоящее время разработаны различные подходы к классификации, индексации и номенклатуре лесных подстилок. Широко используются классификации лесных подстилок А.П. Сапожникова (1984) [22] и Л.Г. Богатырева (1990) [23].

И.М. Яшин и др. (2014) [24] отмечают, что лесная подстилка является сложной высокоорганизованной структурой, определяющей интенсивность и направленность биохимических процессов в почвах и потоков вещества и энергии в лесных экосистемах. При этом, почвенный покров играет важнейшую роль в обеспечении устойчивости лесных биогеоценозов.

Также лесная подстилка, определяя состав и свойства почв, участвует в выполнении функции регулятора состава атмосферного воздуха, тесно связанную с проблемой глобальных изменений климата, которые обусловлены эмиссией парниковых газов, в том числе, почвенного происхождения. Именно поэтому интерес к лесной подстилке как объекту экологического мониторинга постоянно растет. Однако, несмотря на

разносторонние исследования особенностей формирования лесных подстилок в разных природных зонах, все еще остаются слабые места в понимании степени выраженности участия абиогенных и биогенных факторов в накоплении, деструкции и скорости возврата продуктов разложения в биологический круговорот в условиях одной природной зоны, но различных ландшафтов и типов местности.

Цель настоящих исследований – изучить экологические особенности формирования лесных подстилок дубрав, произрастающих на разных типах местности Доно-Воронежского водораздела.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Территория Доно-Воронежского водораздела находится на стыке двух крупных орографических единиц – Среднерусской возвышенности (правобережная часть с абсолютными отметками 100-250 м) и Окско-Донской равнины (левобережная часть с абсолютными отметками 100-170 м) и имеет сложную геолого-геоморфологическую историю. Структурно-геоморфологические условия правобережной и левобережной частей Среднего Дона различны. Правобережная часть, представленная формами рельефа Среднерусской возвышенности, характеризуется ярусным строением в виде серии эрозионно-денудационных ступеней, выработанных преимущественно на меловых породах. Ступени формировались, начиная с позднего плиоцена в связи со спорадическим поднятием территории. Самой высокой ступенью является первая плиоценовая с абсолютными отметками 215-220 м. В нее врезана вторая эоплейстоценовая ступень с отметками 180-200 м. Третья ступень, датированная первой половиной раннего неоплейстоцена, имеет отметки 160-180 м, и четвертая ступень второй половиной раннего неоплейстоцена находится на отметке 120-140 м.

Левобережная часть Дона сложена плиоценовыми, эоплейстоценовыми и ранненеоплейстоценовыми преимущественно аллювиальными отложениями. Аллювий сформировался согласно аккумулятивным циклам, соответствующим числу денудационных ступеней правобережья Дона. Сопряженность циклов осадконакопления левобережья с денудационными ступенями правобережья указывает на одновременное их формирование. При этом равнинная часть левобережья испытывала опускание, а возвышенная часть правобережья – поднятие. В раннем неоплейстоцене произошло резкое похолодание климата и становление максимального донского оледенения. Последствием его являются накопления моренных и флювиогляциальных образований. Моренные суглинки наиболее широко распространены в Подворонежье, а в долине Дона они размыты. На морене залегают флювиогляциальные отложения, которые по генезису отвечают времени отступания донского оледенения. Пески слагают Воронежский оз, который возвышается над урезом Дона на 70-80 м. Пески оза по простиранию замещаются водораздельным зандром, который на левобережье залегает на кривоборских песках, а на правобережье – на морене. Средне- и поздненеоплейстоценовое время выразилось формированием четырех надпойменных террас: самой древней четвертой, которая врезана во флювиогляциальные отложения третьей, второй и первой. Относительные превышения четырех террас над урезом воды долины Дона составляют 50-60, 30-35, 18-25 и 8-10 (15) м соответственно. В голоценовое время сформировалась пойма, относительная высота которой составляет от 3 до 7 м (В.М. Макеев и др., 2022) [25].

В таких неоднородных геоморфологических условиях сформировались островки лесных массивов, среди которых преобладают дубравы. Для изучения лесных подстилок дубрав были заложены пробные площадки на останцово-водораздельном типе местности (ПП2), надпойменно-террасовом (ПП1, ПП3, ПП5), склоновом (ПП6) и пойменном (ПП4) (рисунок 1).

Согласно классификации дубрав по приуроченности к различным ландшафтным условиям произрастания, предложенной В.Б. Михно (2014) [26], исследуемые дубравы можно отнести к 4 типам: склоновые (приречные), надпойменно-террасовые, пойменные и плакорные. Распределение пробных площадок по типам дубрав представлено в таблице 1. Названия почв на русском

языке приведены согласно классификации и диагностики почв России, 2024, на английском языке согласно международной реферативной базе почвенных ресурсов, 2024 [27].

Сбор данных

Ландшафтная катена, включающая 6 пробных площадок, была заложена весной 2025 года с целью отбора проб лесной подстилки в начале (апрель), в середине (июль) и в конце (октябрь) вегетационного периода (рисунок 1). Все пробные площадки имеют специфические особенности геологического строения, описание которых проводилось с использованием альбома геологических разрезов С.В. Хруцкого и др. (1974) [28].

Пробы лесной подстилки отбирались с использованием деревянной рамки 0,25 х 0,25 м под кроной деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur L., Sp. pl.)* – основных эдификаторов не ближе 1,5 от стволов на всю мощность лесной подстилки до минерального горизонта. Образец подстилки не разбирался на горизонты, так как под пологом широколиственных лесов исследованной территории стратификация на разные по степени разложения слои отсутствует. Образцы подстилок в полевых условиях пакетировали, маркировали.

В лабораторных условиях определяли влажность и плотность (термостатно-весовым методом), фракционный состав (ситовым методом) и рассчитывали запасы лесных подстилок [29]. В настоящей статье представлены результаты обработки весеннего отбора проб лесной подстилки.

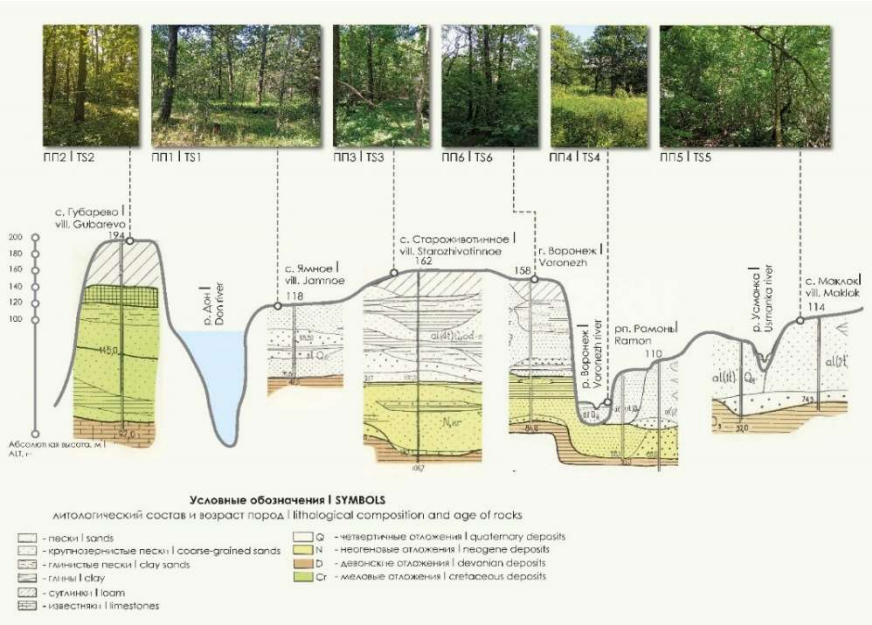


Рисунок 1. Схема расположения пробных площадок в дубравах разных типов местности Доно-Воронежского водораздела

Figure 1. The layout of the test sites in oak forests of Don-Voronezh watershed different types of terrain

Источник: собственная композиция и фото авторов. Элементы геоморфологических профилей взяты из альбома С.В. Хруцкого и др. (1974) [27]

Source: author´s own composition and photos. The geomorphological profiles elements are taken from the album by S.V. Khrutsky and others (1974) [27]

Таблица 1

Типы дубрав Доно-Воронежского водораздела

Table 1

The oak forests types of Don-Voronezh watershed

Таксон | Taxon	Ландшафты | Landscapes			
Семейство | Family	Лесостепные | Forest-steppe			
Класс | Class	Долинно-речные | Valley and river			Междуречные | Watershed
Подкласс | Subclass	Ассиметрично-нейтральные | Asymmetrically neutral			Ассиметричные | Asymmetrical
Тип | Type	Склоновые (приречные) | Slope (riverine)	Надпойменно-террасовые | Above-floodplain-terraced	Пойменные | Floodplain	Плакорные | Flat interfluve
Вид (номер пробной площадки, ПП) | Species (the number of the test site, TS)	Дубрава осоко-снытиевая на серых суглинистых почвах коренного склона р. Воронеж (ПП 6) | Oak forest (*Carex pilisa* Scop., *Aegopodium podagraria* L.*,)* on Haplic Phaeozems of Voronezh river slope (TS 6)	Дубрава ландышевая на дерново-элювоземах песчано-супесчаных нижних террас р. Дон (ПП 1), клено-липо-дубняк разнотравный на серых суглинистых почвах, подстилаемых древнеаллювиальными отложениями высоких террас р. Дон (ПП3), судубрава снытевая на дерново-элювоземах песчано-супесчаных низких террас р. Усманка (ПП 5) | Oak forest (*Convallaria majalis L.*) on Cambisols (Arenic) of Don River lower terraces (TS 1), Maple-Linden-Oak different herbal forest on Haplic Phaeozems (Bathyfluvic) of Don River high terraces (TS 3), Mixed oak forest (*Aegopodium podagraria* L.) on Cambisols (Arenic) of Usmanka River lower terraces (TS 5)	Дубрава земляничная на аллювиальных серогумусовых (дерновых) почвах центральной поймы р. Воронеж (ПП 4) | Oak forest (*Fragaria vesca* L.) on Eutric Fluvisols of central floodplain of Voronezh river (TS 4)	Дубрава осоковая на темно-серых суглинистых почвах водораздела Ведуга-Дон (ПП 2) | Oak forest (*Carex pilisa* Scop.) on Eutric Haplic Phaeozems (Loamic) of Veduga-Don Watershed (TS 2)

Источник: собственные описания авторов.

Source: authors' own descriptions.

Анализ данных

Расчеты количественных показателей и графическая обработка полученных данных осуществлялась с использованием программы Exel, статистическая обработка (корреляционный и регрессионный анализы) велась в программе Statistica.

Результаты и их обсуждение

Островные дубравы Доно-Воронежского раздела произрастают на разных типах местности, что предопределило неоднородность геологического строения пробных площадок и почвенные условия:

ПП 2 (190 м), останцово-водораздельный, водораздел Ведуга-Дон – мощность четвертичных отложений составляет около 20м, представлены покровными и делювиальными отложениями и ледниковыми отложениями днепровского возраста ($prQ_{2,3}$ – glQ_1dn). Залегают на отложениях верхнего и нижнего мела (Cr_2-Cr_1), которые подстилаются породами верхнего девона (D_3);

ПП 1 (118 м), надпойменно-террасовый, нижняя надпойменная терраса р. Дон – мощность четвертичных отложений составляет 42 м, которые представлены древним аллювием (alQ_3). С поверхности залегает толща средне- и мелкозернистого песка мощностью около 18 м, ниже переходит в крупнозернистый песок с прослойкой глин. Глубже подстилаются девонскими отложениями (D_3);

ПП 3 (160 м), надпойменно-террасовый, IV терраса р. Дон – мощность четвертичных отложений составляет 62 м, которые представлены древним аллювием ($al(4t)Q_1$). С поверхности залегает суглинистый чехол мощностью около 15 м, ниже подстилается тонкой глинистой прослойкой, глубже которой идет чередование глинистых песков, глин и песков разной зернистости. Глубже подстилаются неогеновыми отложениями (N_2);

ПП 6 (160 м), склоновый, коренной склон р. Воронеж – мощность четвертичных отложений составляет 60 м, которые представлены древним аллювием $al(4t)Q_2$). С поверхности залегают суглинки, сменяющиеся чередованием мелко- и среднезернистого песка с включением прослоек глин и крупнозернистого песка. Глубже подстилаются неогеновыми глинами (N_2);

ПП 4 (90 м), пойменный, центральная пойма р. Воронеж – мощность четвертичных отложений составляет 12 м, которые представлены поверхностным ярусом современного аллювия (alQ_4), состоящего из пород глинистого состава с поверхности и мелкозернистого песка в основании, глубже современный аллювий подстилается древнеаллювиальными крупнозернистыми песчаными отложениями ($al(1t)Q_3$). Глубже подстилаются девонскими глинами (D_3);

ПП 5 (114 м), надпойменно-террасовый, II НПТ р. Усманка – мощность четвертичных отложений составляет 40 м, которые представлены древним аллювием ($al(2t)Q_3$). С поверхности залегает толща средне- и мелкозернистого песка мощностью около 34 м, ниже переходит в тонкий слой крупнозернистого песка. Глубже подстилаются девонскими глинами (D_3).

Важным экологическим показателем лесной подстилки является ее мощность, по значениям которой можно судить о преобладании аккумулятивных или деструктивных процессов. По данному показателю, согласно классификации Л.Г. Богатырева (1990) [23], лесные подстилки всех типов дубрав данной катены относятся к деструктивным примитивным очень маломощным (менее 5 см) лиственным, что свидетельствует о преобладании процессов разрушения лесной подстилки над накоплением под пологом дубрав. Однако максимальные значения мощности лесной подстилки (4,85±1,95 см) зафиксированы на плакорах под дубравами осоковыми на темно-серых суглинистых почвах (таблица 2). Однако при распределении всех измерений мощности лесной подстилки по пробным площадкам, можно выделить две группы показателей: дубравы с мощностью лесной подстилки менее 3 см (ПП 3, 5, 6) и более 3 см (ПП 1, 2, 4) (рисунок 2).

Существенное значение для биологического круговорота веществ в лесных экосистемах имеют запасы лесной подстилки. В начале вегетационного периода, когда основная масса легкодоступного детрита уже использована деструкторами, а новой порции опада еще не поступило, запасы лесной подстилки составляют 2,1-7,2 т/га, исключение составляет старовозрастная судубрава снытевая на дерново-элювоземах песчано-супесчаных низких террас р. Усманка, под которой зафиксированы 27,0 т/га. Такая величина запаса обусловлена максимальными значениями плотности (0,171 г/см3) при минимальных значениях мощности.

Запасы лесных подстилок зависят как от биоценотических показателей лесной экосистемы, так и от таких физических свойств, как мощность, влажность и плотность лесной подстилки. Для определения степени этой зависимости были построены логарифмические линии тренда, которые используется для описания экспериментальных данных, убывающих или возрастающих с переменной скоростью. Зависимость запасов от влажности описывается уравнением

логарифмической линии тренда y = -2,991ln(x) + 14,839, при коэффициенте детерминации R^2 = 0,0272, зависимость запасов от мощности описывается уравнением y = -13,47ln(x) + 23,137 (R^2 = 0,4403), зависимость запасов от плотности описывается уравнением y = 6,9086ln(x) + 35,469 (R^2 = 0,8539).

Таким образом, для деструктивных лесных подстилок на всех ландшафтных уровнях катены выявлена наиболее тесная прямая зависимость запасов лесной подстилки от ее плотности, что подтверждается коэффициентом детерминации, максимально близким к 1. Это подтверждается результатами исследования для дубравы ПП5, где при средней мощности лесной подстилки 1,70±2,06 см и ее плотности 0,171 г/см3 формируются максимальные запасы 27,0 т/га.

Особое значение при характеристике лесных подстилок имеет их фракционный состав, который отражает степень выраженности деструктивных процессов и скорость возврата органоминеральных веществ в почвы. Доля листьев главного эдификатора широколиственной лесной экосистемы в составе лесной подстилки является важным показателем скорости возврата продуктов деструкции в биологический круговорот. Пойменные дубравы земляничные формируют лесную подстилку с максимальным количеством листового опада главного эдификатора – дуба черешчатого, 56,4% (таблица 3). Второе место по этому показателю занимают надпойменно-террасовые дубрава ландышевая и клено-липо-дубняк разнотравный – 47,9 и 44,6 % соответственно. На третьей позиции плакорная дубрава осоковая (33,3 %) и склоновая (приречная) дубрава осоко-снытиевая на коренном склоне р. Воронеж (31,5 %). Особое место занимает старовозрастная судубрава снытиевая, произрастающая на низких террасах р. Усманки, 75% лесной подстилки которой приходится на трудно разлагаемую кору.

Таблица 2

Экологические показатели и запасы лесной подстилки разных типов дубрав

Table 2

Ecological indicators and stocks of forest litter of different types of the Oak forests

Тип дубравы | The oak forests types		Мощность (M±σ), см | Thickness (M±σ), cm	Влажность, % | Humidity, %	Плотность, г/см^3 | Density, g/cm^3	Запасы, т/га | Stocks, t/ga
Плакорные, ПП2 | Flat interfluve, TS2		4,85±1,95 (n=7)	7,2	0,005	2,10
Пойменные, ПП4 | Floodplain, TS4		4,50±1,70 (n=10)	8,8	0,007	2,48
Надпойменно-террасовые | Above-floodplain-terraced	ПП1 | TS1	4,71±0,95 (n=7)	10,7	0,010	4,44
	ПП3| TS3	1,89±1,54 (n=9)	10,3	0,018	3,15
	ПП5| TS5	1,70±2,06 (n=10)	7,4	0,171	27,0
Склоновые (приречные), ПП6 | Slope (riverine), TS6		2,90±0,77 (n=10)	30,2	0,032	7,21

Примечание: M±σ – среднее арифметическое и стандартное отклонение; n – объем выборки.

Note: M±σ - Mean and Stantard deviation; n – sample size.

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations.

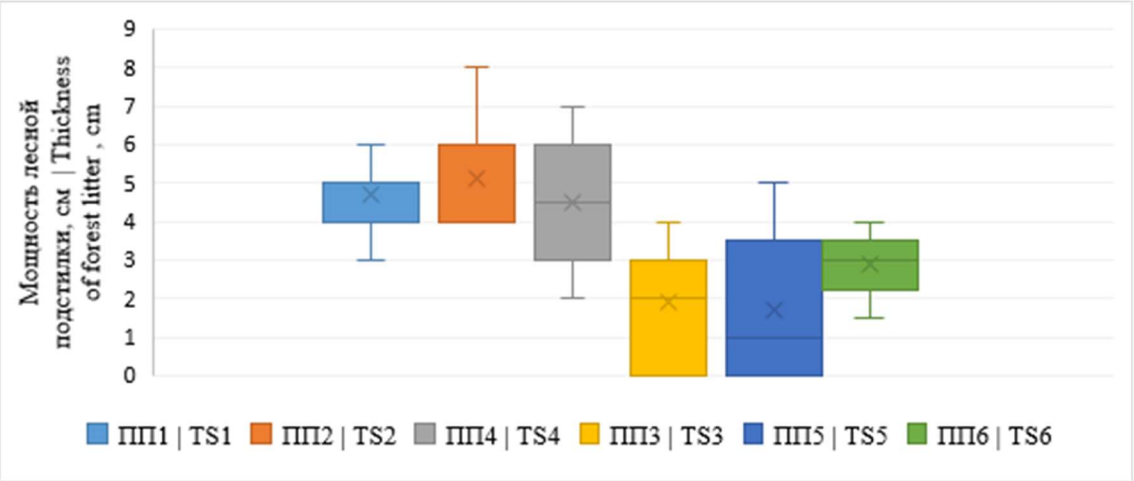


Рисунок 2. Мощность лесной подстилки дубрав в начале вегетационного периода (май 2025 г.)

Figure 2. Forest litter thickness of Oak forests at the beginning of the growing season (May of 2025th)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author´s own composition

Для обобщения сведений о фракционном составе лесной подстилки все фракции были сгруппированы по степени выраженности деструктивного процесса в три блока: активная часть лесной подстилки, которая еще сохраняет морфологические признаки, форму и очертания, но легко разлагается (листья и травянистые остатки), пассивная часть, включающая мертвую органику из трудно разлагаемых компонентов (желуди, древесная кора, полуразложившаяся древесина) и фракцию менее 1 см, которая уже потеряла морфологические признаки в процессе первичной деструкции (труха и ферментированная масса).

Максимальное количество активной фракции (65%) содержится в лесной подстилке дубравы земляничной пойменного типа местности (ПП4), и, следовательно, здесь максимально быстро включится в биологический круговорот продукты ее разложения (рисунок 3).

Таблица 3

Фракционный состав лесной подстилки дубрав разных типов местности (%)

Table 3

The forest litter fractional composition of Oak forests of terrain´s different types

Фракции | Fractions	ПП1 | TS1	ПП2 | TS2	ПП3 | TS3	ПП4 | TS4	ПП5 | TS5	ПП6 | TS6
Листья/хвоя | Leaves/needles	47,9	33,3	44,6	56,4	5,8	31,5
Травянистые остатки | Grassy remains	7,8	18,4	1,4	8,2	0,5	0,50
Труха | The dust	1,6	0	0	0	0	12,4
Ферментированная масса | Fermented mass	19,3	2,9	19,8	27,8	1,8	6,8
Ветви | The branches	14,1	43,5	34,2	4,0	16,9	31,5
Шишки/Желуди | The cones/acorns	9,3	1,9	0	3,6	0	15,4
Остатки мхов/лишайники | Remains of mosses/lichens	0	0	0	0	0	0
Кора | The bark	0	0	0	0	75,0	1,9
Полуразложившаяся древесина| Half-decomposed wood	0	0	0	0	0	0
Итого | Total	100	100	100	100	100	100

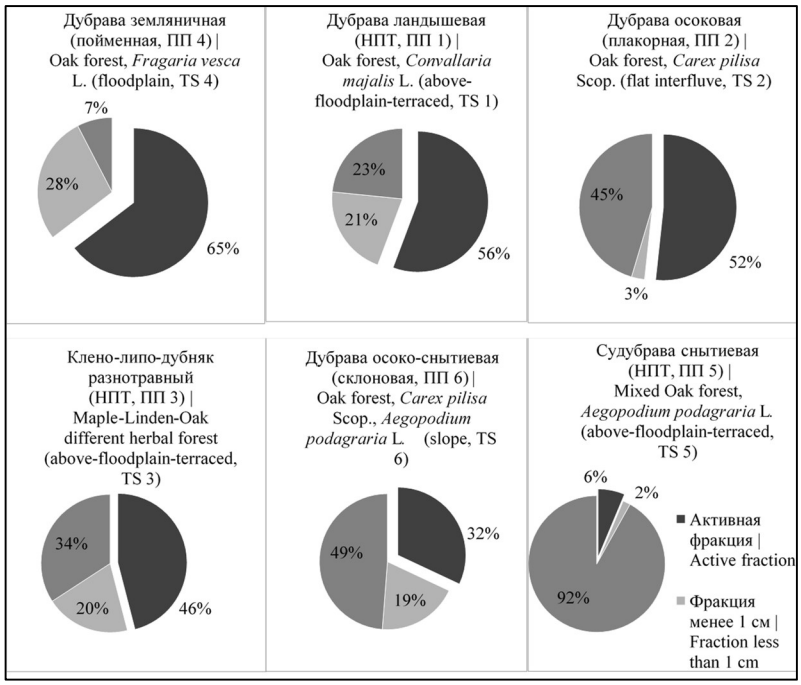


Рисунок 3. Доля активной (листья и травянистые остатки), пассивной (ветви, желуди, остатки мхов и лишайников, кора, полуразложившаяся древесина) и фракции менее 1 см (труха и ферментированная масса) в составе лесных подстилок разных типов местности

Figure 3. The proportion of active (leaves and grassy remains), passive (the branches, acorns, remains of mosses/lichens, the bark, half-decomposed wood) and fractions of less than 1 cm in the forest litter composition of different types of terrain

Источник: собственная композиция авторов

Source: author´s own composition

На втором месте дубравы надпойменно-террасового типа местности (ПП1, ПП3) – 46-56%. За ними следуют дубравы, произрастающие на водоразделах (ПП2), – 52%. Только 32% активной фракции содержится в лесной подстилке дубравы коренного склона р. Воронеж. Минимальное количество быстро разлагаемой фракции (6%) содержится в лесной подстилке судубравы надпойменно-террасового типа местности, которая на 92% состоит из коры деревьев, что является характерной особенностью старовозрастного лесного массива (возраст отдельных дубов достигает более 300 лет).

Выводы

1. Территория Доно-Воронежского водораздела имеет сложную геологическую историю, что предопределило формирование неоднородного современного рельефа и разнообразных эдафических условий для произрастания дубрав. Последние формируют лесные массивы разной площади в условиях пойменного, надпойменно-террасового, склонового (приречного) и останцово-водораздельного типов местности.

2. Несмотря на различия в геологических, топографических, эдафических условиях произрастания дубрав, во всех исследованных лесных экосистемах подстилки весеннего отбора (начала вегетационного периода) относятся к деструктивным примитивным очень маломощным лиственным.

3. Статистическая обработка результатов измерения мощности лесных подстилок и доли активной фракции в ее составе позволила разделить все дубравы на две группы: первая группа включает дубравы земляничную (пойменная), ландышевая (надпойменно-террасовая, терраса р. Дон) и осоковая (плакорная, правобережье р. Дон), в которых мощность лесной подстилки приближается к 5 см (по средним показателям) и более чем на 50 % состоит из активной фракции. Вторая группа включает смешанные дубравы (надпойменно-террасовые, террасы рек Дон и Усманка) и дубравы осоково-снытевые (склоновые, коренной берег р. Воронеж), лесная подстилка которых не превышает

3 см по мощности и менее 50% содержит активных фракций.

4. Корреляционно-регрессионный анализ зависимости запасов лесной подстилки от ее мощности, плотности и влажности показал наиболее тесную прямую связь с плотностью ($R^2 = 0,8539$).

5. По биоресурсному потенциалу, скорости деструктивных процессов и, соответственно, быстроте возврата продуктов разложения лесных подстилок в биологический круговорот, дубравы разных типов местности можно расположить в порядке убывания в следующий вариационный ряд: пойменные дубравы > надпойменно-террасовые дубравы > плакорные дубравы > склоновые (приречные) дубравы.

Список литературы

1. Fuertes A., Moreno-Fernandez D., Jankowski P.A., Alberdi I., Adame P., Gonzalez I., Canellas I., Oliveira N. Drivers of litter dynamics across Spanish forests: An assessment using ICP-forests Level I monitoring data. Forest Ecology and Management. 2025; 596 (2025); 123061. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123061.

2. Canessa R., Brink L., Saldana A., Rios R.S., Hattenschwiler S., Mueller C.W., Prater I., Tielborger K., Bader M.Y. Relative effects of climate and litter traits on decomposition change with time, climate and trait variability. Journal of Ecology. 2021; 109; 447-458. – DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2745.13516.

3. Каганова В.В., Замолодчикова Д.Г., Мостовая А.С. Влияние климата на запасы углерода фитомассы и подстилки в лесных насаждениях юга Европейской России. Лесоведение. – 2023. - № 5. – С. 486-501. – DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114823050030.

4. Карпачевский Л.О., Воронин А.Д., Дмитриев Е.А., Строганова М.Н., Шоба С.А. Почвенно-биогеоценотические исследования в лесных биогеоценозах. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 160 с. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23397185.

5. Stuckenberg T., Lu J.-Z., Scheu S. C, N and P dynamics during litter decomposition in pure and mixed beech – conifer stands: Effects of litter species, site conditions and native vs non-native conifer species. Forest Ecology and Management. 2025; 594 (2025); 122929. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122929.

6. Shigyo N., Umeki K., Hirao T. Soil microbial identity explains home-field advantage for litter decomposition. New Phytologist. 2024; 243, 2146-2156. – DOI: https://doi.org/ 10.1111/nph.19769.

7. Fanin N., Lin D., Freschet G.T., Keiser A.D., Augusto L., Wardle D.A., Veen G.F. Home-field advantage of litter decomposition: from the phyllosphere to the soil. New Phytologist. 2021; 231; 1353-1358. - DOI: https://doi.org/10.1111/nph.17475.

8. Ahirwal J., Saha P., Nath A., Nath A.J., Deb S., Sahoo U.K. Forests litter dynamics and environmental patterns in the Indian Himalayan region. Forest Ecology and Managment. 2021; 499; 119612. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119612.

9. Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях. Известия вузов. Лесной журнал. – 2021. – № 1. – С. 46-59. – DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.

10. Каплина Н.Ф., Кулакова Н.Ю. Фитомасса и запасы углерода и азота в контрастных по продуктивности нагорных дубравах южной лесостепи. Аридные экосистемы. – 2021. – Т. 27. – № 1 (86). – С. 35-42. DOI: https://doi.org /10.24411/1993-3916-2021-10135.

11. Александрова А.Б., Кулагина В.И., Иванов Д.В., Маланин В.В., Марасов А.А. Оценка запасов углерода в лесных подстилках Раифского участка Волжско-Камского заповедника. Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – № 2. – С. 57-62. DOI: https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.57.62.

12. Лиханова И.А., Денева С.В., Холопов Ю.В., Рудь Е.А., Скребенков Е.А., Лаптева Е.М. Особенности лесных подстилок в разных типах среднетаёжных лесов. Теоретическая и прикладная экология. – 2024. – № 2. – С. 72-81. DOI: https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-2-072-081.

13. Ханина Л.Г., Смирнова В. Э., Бобровский М. В. Элементный состав валежа различных древесных пород и стадий разложения в широколиственном лесу заповедника “Калужские Засеки”. Лесоведение. – 2023. – № 4. С. 353-368. – DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114823040034.
14. Бахмет О.Н., Медведева М.В. Разложение опада хвои в почвах лесных культур сосны Восточной Фенноскандии. Лесоведение. – 2022. – № 3. – С. 239-249. - DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114822030032.
15. Богатырев Л.Г., Телеснина В.М., Семенюк О.В., Бенедиктова А.И. Динамика морфологии и химических свойств лесной подстилки в ходе естественного постагрогенного лесовосстановления и ее отражение напочвенным покровом. Вестник Московского Университета. Серия.17. Почвоведение. – 2020. – №3. – С. 3-11. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43061436.
16. Зенкова И.В., Штабровская И.М. Влияние гидротермических условий на подстилочных беспозвоночных вырубок и гарей Хибин. Лесоведение. – 2022. – № 4. – С. 364–380. – DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114822030123.
17. Latterini F., Dyderski K.M., Horodecki P., Lapin K., Jagodziński·A.M. The effects of forest operations and silvicultural treatments on litter decomposition rate: a Meta-analysis. Current Forestry Reports. 2023; 9; 276-290. – DOI: https://doi.org/10.1007/s40725-023-00190-5.
18. Семенюка О. В., Телеснина В. М., Богатырева Л. Г., Земсков Ф. И. Подстилки городских насаждений как индикатор интенсивности биологического круговорота в условиях мегаполиса. Почвоведение. – 2022. – № 6. – С. 673-686. – DOI: https://doi.org/10.31857/S0032180X22060119.
19. Исаев А.В., Демаков Ю.П. Особенности подстилок в пойменных лесах заповедника “Большая Кокшага”. Лесоведение. – 2023. – № 1. – С. 66-76. – DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114823010072.
20. Малышева Н.В., Золина Т.А., Сильнягина Г.В., Филипчук А.Н., Югов А.Н. Исследование взаимосвязи толщины лесной подстилки и лесотаксационных характеристик с помощью методов машинного обучения. Лесохозяйственная информация. – 2025. – № 2. – С. 70–93. DOI: https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2025.2.05.
21. Голядкина И.В., Горбунова Н.С., Шешницан С.С., Бахтин А.М., Царегородцев А.В. Особенности формирования лесной подстилки в условиях старовозрастной лесной полосы каменно-степного опытного лесничества. Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 6-22. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/1.
22. Сапожников А.П. Лесная подстилка – номенклатура, классификация и индексация. Почвоведение. –1984. – № 5. – С. 96-105. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=26442409
23. Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок. Почвоведение. – 1990. – №3. – С. 119-127. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25886589.
24. Яшин И.М., Когут Л.П., Прохоров И.С., Васенев И.И. Экологическое состояние почв в условиях полевых и лесопарковых экосистем Московского мегаполиса. Агрохимический Вестник. 2014. – № 2. – С. 17-21. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30685906**.**
25. Макеев В.М., Пикулик Е.А., Гусельцев А.С. Неотектонические структуры и современная геодинамика района среднего течения р. Дон (территория Новоронежской АЭС). Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – № 64 (1). – С. 75-87. – DOI:10.32454/0016-7762-2022-64-1-75-87.
26. Михно В.Б. Ландшафтный аспект произрастания, дифференциации и структурной организации дубрав Среднерусской лесостепи. Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2014. – № 1. – С. 9-17. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21455300
27. Мировая реферативная база почвенных ресурсов. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и составления легенд почвенных карт: пер. с англ. Софии Фортовой. Науч. ред. пер. М.И. Герасимовой, П.В. Красильникова. Москва. – 2024. – 248 с. DOI: https://doi.org/10.29003/m4174.978-5-317 07235-3.
28. Хруцкий С.В., Смольянинов В.М., Косцова Э.В. Альбом геологических разрезов Центрально-Черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1974. – 176 с.
29. Шумаков В.С., Федорова Е.Л. Методические рекомендации по определению запасов лесной подстилки и её зольности при лесоводственных исследованиях. М.: ВНИИЛХ, 1979. – 38 с.

References

1. Fuertes A., Moreno-Fernandez D., Jankowski P.A., Alberdi I., Adame P., Gonzalez I., Canellas I., Oliveira N. *Drivers of litter dynamics across Spanish forests: An assessment using ICP-forests Level I monitoring data. Forest Ecology and Management*. 2025; 596 (2025): 123061. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123061.
2. Canessa R., Brink L., Saldana A., Rios R.S., Hattenschwiler S., Mueller C.W., Prater I., Tielborger K., Bader M.Y. *Relative effects of climate and litter traits on decomposition change with time, climate and trait variability*. Journal of Ecology. 2021; 109: 447-458. DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2745.13516.
3. Kaganova V.V., Zamolodchikova D.G., Mostovaja A.S. *Vlijanie klimata na zapasy ugleroda fitomassy i podstilki v lesnyh nasazhdenijah juga Evropejskoj Rossii.* [Climate affecting the carbon, phytomass and litter stocks in forest stans of the South of the European Russia]. Lesovedenie. 2023; № 5: 486-501. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114823050030.
4. Karpachevskij L.O., Voronin A.D., Dmitriev E.A., Stroganova M.N., Shoba S.A. *Pochvenno-biogeocenoticheskie issledovanija v lesnyh biogeocenozah.* [Soil and biogeocenotic studies in forest biogeocenoses]. Moskovskij gosudarstvennyj universitet. 1980;160. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23397185.
5. Stuckenberg T., Lu J.-Z., Scheu S. *C, N and P dynamics during litter decomposition in pure and mixed beech – conifer stands: Effects of litter species, site conditions and native vs non-native conifer species.* Forest Ecology and Management. 2025; 594 (2025): 122929. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122929.
6. Shigyo N., Umeki K., Hirao T. *Soil microbial identity explains home-field advantage for litter decomposition.* New Phytologist. 2024; 243: 2146-2156. DOI: https://doi.org/ 10.1111/nph.19769.
7. Fanin N., Lin D., Freschet G.T., Keiser A.D., Augusto L., Wardle D.A., Veen G.F. *Home-field advantage of litter decomposition: from the phyllosphere to the soil*. New Phytologist. 2021; 231: 1353-1358. DOI: https://doi.org/10.1111/nph.17475.
8. Ahirwal J., Saha P., Nath A., Nath A.J., Deb S., Sahoo U.K. *Forests litter dynamics and environmental patterns in the Indian Himalayan region.* Forest Ecology and Managment. 2021; 499: 119612. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119612.
9. Nakvasina E.N., Shumilova Ju.N. *Dinamika zapasov ugleroda pri formirovanii lesov na postagrogennyh zemljah*. [Dynamics of carbon stocks in the formation of forests on post-agrogenic lands]. Izvestija vuzov. Lesnoj zhurnal. 2021; № 1: 46-59. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.
10. Kaplina N.F., Kulakova N.Ju. *Fitomassa i zapasy ugleroda i azota v kontrastnyh po produktivnosti nagornyh dubravah juzhnoj lesostepi.* [Phytomass and carbon and nitrogen reserves in the contrasting productivity of upland oak forests of the southern forest steppe] Aridnye jekosistemy. 2021; Vol. 27; № 1 (86): 35-42. (In Russ.). DOI: https://doi.org /10.24411/1993-3916-2021-10135.
11. Aleksandrova A.B., Kulagina V.I., Ivanov D.V., Malanin V.V., Marasov A.A. *Ocenka zapasov ugleroda v lesnyh podstilkah Raifskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika*. [Assessment of carbon reserves in forest litter of the Raifa area of Volzhsko-Kamsky state natural biosphere reserve]. Rossijskij zhurnal prikladnoj jekologii. 2023; № 2: 57-62. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.57.62.
12. Lihanova I.A., Deneva S.V., Holopov Ju.V., Rud' E.A., Skrebenkov E.A., Lapteva E.M. *Osobennosti lesnyh podstilok v raznyh tipah srednetajozhnyh lesov.* [Litter features in different forest types in the middle taiga subzone]. Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija. 2024; № 2: 72-81. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-2-072-081.
13. Hanina L.G., Smirnova V. Je., Bobrovskij M. V. *Jelementnyj sostav valezha razlichnyh drevesnyh porod i stadij razlozhenija v shirokolistvennom lesu zapovednika "Kaluzhskie Zaseki*". [Dead wood elements composition in different tree species and stages of decay in the broad-leaved forests of The Kaluzhskie Zaseki Reserve]. Lesovedenie. 2023; № 4: 353-368. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114823040034.

14. Bahmet O.N., Medvedeva M.V. *Razlozhenie opada hvoi v pochvah lesnyh kul'tur sosny Vostochnoj Fennoskandii.* [Pine needles litter decomposition in soils of The Eastern Fennoscandia's pine plantations]. Lesovedenie. 2022; № 3: C. 239-249. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114822030032.

15. Bogatyrev L.G., Telesnina V.M., Semenjuk O.V., Benediktova A.I. *Dinamika morfologii i himicheskih svojstv lesnoj podstilki v hode estestvennogo postagrogennogo lesovosstanovlenija i ee otrazhenie napochvennym pokrovom.* [Dynamics of morphology and chemical properties of forest litter during natural postagrogenic reforestation and its reflection by the ground cover]. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Serija.17. Pochvovedenie. 2020; №3: 3-11. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43061436.

16. Zenkova I.V., Shtabrovskaja I.M. *Vlijanie gidrotermicheskih uslovij na podstilochnyh bespozvonochnyh vyrubok i garej Hibin.* [Hydrothermal conditions affecting the forest litter invertebrates in the cuttings and burnt areas of Khibiny mountains] Lesovedenie. 2022; № 4: 364-380. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114822030123.

17. Latterini F., Dyderski K.M., Horodecki P., Lapin K., Jagodziński·A.M. *The effects of forest operations and silvicultural treatments on litter decomposition rate: a Meta-analysis.* Current Forestry Reports. 2023; 9: 276-290. DOI: https://doi.org/10.1007/s40725-023-00190-5.

18. Semenjuka O. V., Telesnina V. M., Bogatyreva L. G., Zemskov F. I. *Podstilki gorodskih nasazhdenij kak indikator intensivnosti biologicheskogo krugovorota v uslovijah megapolisa.* [Biological Cycling in Urban Stands (Byttsevsky Les Protected Area)] Pochvovedenie. 2022; № 6: 673-686. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0032180X22060119.

19. Isaev A.V., Demakov Ju.P. *Osobennosti podstilok v pojmennyh lesah zapovednika "Bol'shaja Kokshaga".* [Features of litter in floodplain forests of the Bolshaya Kokshaga Nature Reserve]. Lesovedenie. 2023; № 1: 66-76. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0024114823010072.

20. Malysheva N.V., Zolina T.A., Sil'njagina G.V., Filipchuk A.N., Jugov A.N. *Issledovanie vzaimosvjazi tolshhiny lesnoj podstilki i lesotaksacionnyh harakteristik s pomoshh'ju metodov mashinnogo obuchenija*. [Exploring the relationship between forest litter thickness and forest taxation characteristics using machine learning methods]. Lesohozjajstvennaja informacija. 2025; № 2: 70-93. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2025.2.05.

21. Goljadkina I.V., Gorbunova N.S., Sheshnican S.S., Bahtin A.M., Caregorodcev A.V. *Osobennosti formirovanija lesnoj podstilki v uslovijah starovozrastnoj lesnoj polosy Kamenno-Stepnogo opytnogo lesnichestva*. [Features of plant litter in the conditions of old-age shelterbelt in The Kamennaya Steppe] Lesotehnicheskij zhurnal. 2025; Vol. 15; № 1 (57): C. 6-22. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/1

22. Sapozhnikov A.P. *Lesnaja podstilka – nomenklatura, klassifikacija i indeksacija*. [Forest litter – nomenclature, classification and indexing]. Pochvovedenie. 1984; № 5: 96-105. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=26442409.

23. Bogatyrev L.G. *O klassifikatsii lesnykh podstilok* [On classification of forest litter]. Pochvovedenie. 1990; №3: 119-127. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25886589.

24. Jashin I.M., Kogut L.P., Prohorov I.S., Vasenev I.I. *Jekologicheskoe sostojanie pochv v uslovijah polevyh i lesoparkovyh jekosistem Moskovskogo megapolisa.* [The ecological state of soils in the conditions of field and forest park ecosystems of the Moscow metropolis]. Agrohimicheskij vestnik. 2014; № 2: 17-21. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30685906**.**

25. Makeev V.M. Pikulik E.A., Gusel'tsev A.S. *Neotektonicheskie struktury i sovremennaya geodinamika raiona srednego techeniya r. Don (territoriya Novoronezhskoi AES)* [Neotectonic structures and modern geodynamics of the middle flow region of the Don river (the territory of the Novovoronezh nuclear power plant] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]. 2022; № 64 (1): 75-87. (In Russ.). DOI:10.32454/0016-7762-2022-64-1-75-87.

26. Mikhno V.B. *Landshaftnyi aspekt proizrastaniya, differentsiatsii i strukturnoi organizatsii dubrav Srednerusskoi lesostepi* [Landscape Aspects of Growth, Differentiation, and Structural Organization of Oak Forests in the Central Russian Forest-Steppe] *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2014; № 1: 9-17. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21455300.

27. *Mirovaya referativnaya baza pochvennyh resursov. Mezhdunarodnaya sistema pochvennoj klassifikacii dlya diagnostiki pochv i sostavleniya legend pochvennyh kart: per. s angl. Sofii Fortovoj. Nauch. red. per. M.I. Gerasimovoj, P.V.*

Krasil'nikova. [World soil resource reference database. international soil classification system for soil diagnostics and soil map legends]. 2024; 248. (In Russ.). URL: https://doi.org/10.29003/m4174.978-5-317-07235-3.

28. Khrutskii S.V., Smol'yaninov V.M., Kostsova E.V. *Al'bom geologicheskikh razrezov Tsentral'no-Chernozemnykh oblastei* [Album of Geological Sections of the Central Chernozem Regions]. Voronezh: Publ. Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. 1974; 176. (In Russ.).

29. Shumakov V.S., Fedorova E.L. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniju zapasov lesnoj podstilki i ejo zol'nosti pri lesovodstvennyh issledovanijah*. [Methodological recommendations for the determination of forest litter stocks and its ash content in forestry research]. 1979; 38. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉*Алаева Лилия Алексеевна* – канд. биол. наук, доцент, кафедра экологии и земельных ресурсов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3187-6790, e-mail: liliya-250477@yandex.ru.

Девятова Татьяна Анатольевна – доктор биол. наук, профессор, зав. кафедрой экологии и земельных ресурсов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8722-1126, e-mail: devyatova@bio.vsu.ru.

Негробова Елена Андреевна – ассистент, кафедра экологии и земельных ресурсов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018, ORCID: https://orcid.org/0009- 0002-5304-2186, e-mail: elena-negrobova@yandex.ru.

Бочаров Павел Павлович – соискатель кафедры менеджмента и экономики предпринимательства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009- 0007-0416-0668, e-mail: pashaboch@gmail.com.

Information about the authors

✉*Liliia A. Alaeva* – PhD of Sci (Biol.), Associate Professor (Docent), Ecology and Land Resources Department, Voronezh State University, Universitetskaya square 1, Voronezh, Russian Federation, 394018, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3187-6790, e-mail: liliya-250477@yandex.ru.

Tatiana A. Deviatova – Doctor of Sci (Biol.), Full Professor, Head of Ecology and Land Resources Department, Voronezh State University, Universitetskaya square 1, Voronezh, Russian Federation, 394018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8722-1126, e-mail: devyatova@bio.vsu.ru.

Elena A. Negrobova – Assistant, Ecology and Land Resources Department, Voronezh State University, Universitetskaya square 1, Voronezh, Russian Federation, 394018, ORCID: https://orcid.org/0009- 0002-5304-2186, e-mail: elena-negrobova@yandex.ru.

Pavel P. Bocharov – Applicant at the Department of Management and Business Economics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009- 0007-0416-0668, e-mail: pashaboch@gmail.com.

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/2
УДК 630*52: 630*228.51

Оценка лесоводственной эффективности проходных рубок в северотаежном лесном районе

Александр П. Богданов[1,2] ✉, aleksandr_bogd@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1655-7212
Алексей С. Ильинцев[1,2], a.ilintsev@narfu.ru https://orcid.org/0000-0003-3524-4665
Сергей В. Третьяков[1,2], s.v.tretyakov@narfu.ru https://orcid.org/0000-0001-5982-3114
Сергей В. Коптев[1,2], s.koptev@narfu, https://orcid.org/0000-0002-5402-1953

[1]*ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, 163062, Российская Федерация*

[2]*ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация*

Стационарные исследования лесов остаются наиболее достоверным методом для оценки эффективности лесохозяйственных мероприятий. В статье приведены результаты 13-летних наблюдений на постоянных пробных площадях, заложенных в Обозерском лесничестве Архангельской области. Объектами наблюдений являются смешанные насаждения, пройденные проходными рубками в северотаежном районе. Целью исследования является анализ изменений таксационных показателей, устойчивости и продуктивности смешанных сосновых черничных насаждений северотаежного района после проведения проходных рубок. Современная структура лесного фонда Архангельской области и Европейского Севера России характеризуется значительным преобладанием производных лесов, сформировавшихся под влиянием многолетней хозяйственной деятельности. Эти насаждения отличаются сложной возрастной и породной дифференциацией, что обуславливает особую актуальность разработки научно обоснованных подходов к ведению лесного хозяйства в средневозрастных и приспевающих древостоях. Повышение эффективности лесоуправления в данных условиях имеет важное социально-экономическое значение, поскольку позволяет одновременно решать задачи устойчивого лесопользования и обеспечения сырьевой базы лесопромышленного комплекса. Для организации и проведения мониторинговых работ обследовано 6 насаждений вторичных генераций. Повторный перечет позволил оценить строение и товарность древостоев. Для оценки лесоводственной эффективности учитывались изменения таксационных показателей древостоев, отражающие динамику роста и развития деревьев в новых условиях среды. Пробные площади закладывались для мониторинга изменений при рубках ухода с использованием методов лесной таксации. На каждой пробной площади определялись количественные и качественные параметры древостоя (состав, средняя высота и диаметр элементов древостоя, возраст, класс бонитета, относительная и абсолютная полнота, запас на корню, товарность, физиологическое состояние), а также характеристики подроста и подлеска. Мониторинг изменений осуществлялся путём повторных измерений через 8 и 13 лет после рубки. По результатам многолетних исследований лесное сообщество не утратило устойчивости, что проявляется в сохранении продуктивности древостоев и стабильной динамике их таксационных показателей. Наблюдаемая дифференциация стволов отражает естественный процесс конкурентных взаимоотношений между различными породами. Анализ изменений таксационных характеристик выявил адаптацию насаждений к новым условиям среды при сохранении основных экосистемных функций. На пяти пробных площадях зафиксировано снижение доли участия сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в составе древостоя на одну единицу, что отражает характерную динамику трансформации породной структуры после проведения выборочных рубок в смешанных сосновых насаждениях. На древостои значительное влияние оказывает конкуренция между видами, приводящая к уменьшению доли сосны в составе насаждений, а также изменения в

вертикальной структуре, которые стимулируют формирование многоярусных древостоев и их продуктивности. Дальнейшее изучение особенностей роста насаждений после проведения проходных рубок позволит разработать рекомендации по частоте и интенсивности рубок, направленных на поддержание продуктивности смешанных древостоев.

Ключевые слова: *проходные рубки, динамика, лесоводственная эффективность, запас древесины, смешанные сосновые древостои*

Финансирование: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства по теме 4-И25 проходные рубки «Оптимизация проведения проходных рубок в смешанных таежных насаждениях европейской части Российской Федерации для интенсификации использования лесов и региональные сценарии их долгосрочного воздействия на производство древесины» (регистрационный номер: 125021202048-9).

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Авторы выражают особую благодарность Ершову Р.А. за помощь в закладке постоянных пробных площадей и проведении исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Оценка лесоводственной эффективности проходных рубок в северотаежном лесном районе / А.П. Богданов, А.С. Ильинцев, С.В. Третьяков, С.В. Коптев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 23-38. – *Библиогр.: с. 33-37 (29 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/2.

Поступила 07.08.2025. ***Пересмотрена*** 05.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Assessment of the silvicultural efficiency of thinning cuttings in the northern taiga forest region

Alexander P. Bogdanov[1,2], ✉, aleksandr_bogd@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1655-7212
Alexey S. Ilintsev[1,2] , a.ilintsev@narfu.ru https://orcid.org/0000-0003-3524-4665
Sergey V. Tretyakov[1,2], s.v.tretyakov@narfu.ru https://orcid.org/0000-0001-5982-3114
Sergey V. Koptev[1,2], s.koptev@narfu, https://orcid.org/0000-0002-5402-1953

[1]*Northern Research Institute of Forestry, Nikitova, str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation*
[2]*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation*

Abstract

The article presents the 13-th years observations results on permanent sample plots established in the Obozersky forestry district of the Arkhangelsk region. The objects of observation are mixed stands that have middle-aged stands thinning in the northern taiga region. The study focuses on mixed stands subjected to thinning operations in the northern taiga region.

The research aims to analyze changes in mensuration parameters, stability, and productivity of mixed bilberry pine stands in the northern taiga following thinning operations. The current forest structure in Arkhangelsk region and the European North of Russia is characterized by a significant predominance of secondary forests formed under long-term management activities. These stands exhibit complex age and species differentiation, highlighting the particular relevance of developing science-based approaches for managing middle-aged stands. Improving forest management efficiency under these conditions holds important socio-economic significance as it simultaneously addresses sustainable forest use and ensures the raw material base for the timber industry. For the monitoring organization and implementation, 6 second-generation stands were surveyed. Repeated inventories allowed assessment of stand structure and timber quality. To evaluate silvicultural effectiveness, changes in stand mensuration parameters were analyzed, reflecting tree growth and development dynamics under new environmental conditions. The sample plots were established to monitor changes following thinning operations using forest mensuration methods. Each plot assessed quantitative and qualitative stand parameters (species composition, mean height and diameter, age, site class, relative and absolute density, growing stock, timber quality, physiological condition), as well as understory and shrub layer characteristics. Monitoring was conducted through repeated measurements at 8 and 13 years post-treatment. The long-term study revealed that the forest community maintained its stability, evidenced by preserved stand productivity and stable dynamics of mensuration parameters. Observed stem differentiation reflects natural competitive interactions between species. Analysis of mensuration characteristics demonstrated stand adaptation to new environmental conditions while maintaining key ecosystem functions. On five sample plots, a one-unit decrease in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) proportion was recorded, reflecting characteristic species composition transformation dynamics following selective thinning in mixed pine stands. Stands showed significant interspecies competition effects, leading to reduced pine proportion and vertical structure changes that stimulate multi-layered stand formation and productivity enhancement. Continued analysis of stand growth trends after thinning interventions will facilitate the formulation of guidelines regarding treatment frequency and intensity, with the goal of sustaining productivity within mixed stands.

Keywords: *thinning, dynamics, forestry effectiveness, timber stock, mixed pine stands*

Funding: The publication was prepared based on the results of research carried out as part of the state task of the Northern Research Institute of Forestry to conduct applied scientific studies related to the field of activities of the Federal Forestry Agency, specifically addressing the topic 4-I25 thinning: "Optimization of thinning in mixed taiga stands of the European part of the Russian Federation to intensify forest use and regional scenarios of their long-term impact on timber production" (registration number of the topic: 125021202048-9).

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The authors express their sincere gratitude to R.A. Ershov for his assistance in establishing permanent test sites and conducting research.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: A.P. Bogdanov, A.S. Ilyintsev. S.V. Tretyakov, S.V. Koptev (2025). Assessment of the silvicultural efficiency of thinning cuttings in the northern taiga forest region. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 23-38 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/2.

Received 07.08.2025. ***Revised*** 05.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Рубки ухода являются одним из ключевых элементов лесного хозяйства. Проведение рубок ухода направлено на повышение ресурсного потенциала лесов и обеспечение их устойчивого развития[1].

Удаление ослабленных, нежелательных, некачественных деревьев и создание соответствующих условий роста для перспективных

[1] Чибисов Г. А., Гущин В. А., Фомин А. П., Захаров А. Ю. Лесоводственная и экономическая эффективность рубок ухода : практ. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск : Изд-во САФУ, 2011. 108 с.

деревьев являются важнейшими целями рубок ухода. Исследования, проведенные в различных насаждениях и условиях произрастания, подтверждают, что рубки ухода оказывают положительное влияние на рост оставшихся деревьев и продуктивность насаждений [1, 2]. Дополнительными лесоводственными целями рубок ухода являются улучшение санитарного состояния насаждений и создание условий для естественного возобновления деревьев целевых пород [3, 4]. Применение лесоводственных мероприятий в большинстве случаев оказывает влияние на все экологические аспекты. Например, после удаления деревьев из полога насаждений, происходят изменения в уровнях поступления света, воды и температуры в лесную экосистему.

Рубки ухода могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на лесные экосистемы в зависимости от типа, интенсивности разреживания, степени повреждения почвы и оставшихся деревьев [5]. Повреждение почвы во время заготовки и транспортировки древесины может привести к серьезным экономическим потерям в результате снижения интенсивности роста деревьев, вызванного болезнями и заселением вредными насекомыми, что может вызвать распад формирующихся насаждений. Следствием этого является потеря деловой древесины и ухудшение качества лесных насаждений [6]. Одним из факторов, способствующих этому снижению, являются несоответствующие методы лесоуправления. В этом случае постоянный мониторинг состояния насаждений, пройденных рубками ухода, имеет важное значение для принятия управленческих решений по поддержанию многочисленных функций лесных экосистем.

Густота, пространственная структура, качество оставляемых и вырубаемых стволов, степень и интенсивность повреждения оставшихся деревьев и почвы являются важными вопросами и проблемами рубок ухода [7]. Кроме того, растущая важность ответственного и устойчивого управления лесами (УУЛ) требует все более всесторонней оценки проведения различных видов рубок, в том числе рубок ухода, с целью минимизации возможного ущерба лесным экосистемам [8, 9].

На основе материалов лесоустройства, проведенного в последние годы на территории Архангельской области[2], расширяется ресурсная база для организации проведения рубок ухода на территории лесного фонда. Сотрудниками Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства разрабатываются научно-методические рекомендации, позволяющие оптимизировать проведение проходных рубок, что будет способствовать достижению значительного лесоводственного и экономического эффекта.

В Архангельской области проходные рубки являются преобладающим видом рубок ухода. А.С. Ильинцев и др. (2021) [10] отмечают, что на их долю приходится более 80 % заготовленной в результате рубок ухода древесины. В результате проведения проходных рубок лесопользователь получает достаточно большие объемы ликвидной древесины, поэтому изучение данного вида рубок является актуальным и востребованным, что отражено в работе M. Hiltunen, и др. (2021) [11]. Необходимо помнить, что основной целью проходных рубок является создание благоприятных условий роста лучших деревьев, увеличения их прироста, продолжения (завершения) формирования структуры насаждений[3].

Цель исследования – оценка динамики таксационной характеристики древостоев и их товарной структуры после проведения проходных рубок в смешанных сосняках на территории северотаежного района европейской части России.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач исследования был составлен план проведения полевых и камеральных работ. Предварительно изучены материалы лесоустройства (планы-лесонасаждений, таксационные описания),

[2] Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 13 декабря 2022 г. N 1024 "Об утверждении плана проведения лесоустройства на 2023-2024 годы" (с изменениями и дополнениями)]

[3] Рубки ухода 2020. Приказ МПР РФ от 30 июля 2020 года № 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами». – URL: https://docs.cntd.ru/document/565780469 (дата обращения: 04.02.2023).

технологические карты, проекты освоения лесов, а также доступные космоснимки. По результатам анализа материалов и транспортной доступности подобраны опытные участки на территории Обозерского лесничества в северо-таежном районе европейской части Российской Федерации[4].

Исследуемые насаждения, сформировались естественным путем на месте сплошных концентрированных рубок и пожаров (на старых пнях видны следы пожара). Возобновление под пологом исследуемых насаждений происходит в основном елью (Picea abies (L.) Karst) и березой (Betula pendula Roth) [3], что характерно для естественного возобновления в лесах района исследования. Большая часть подроста является перспективной, но встречается поврежденный в процессе рубки подрост, а также сухие и не жизнеспособные экземпляры.

В 2009 году проведена проходная комплексная рубка умеренно-высокой интенсивности. Рубка проводилась равномерным способом с удалением деревьев из верхнего полога древостоя. Способ рубки включал валку деревьев, обрезку сучьев бензопилами и трелевку трактором ТДТ-55 с чокерной оснасткой. В 2017 году заложено 6 постоянных пробных площадей, а в 2022 году проведен повторный перечет. Возраст древостоев на момент рубки составлял 55 - 80 лет. В настоящее время на месте рубки сформировались продуктивные смешанные сосново-елово-березовые древостои с запасом древостоев на корню от 196 до 287 м3/га. На момент обследования количество сухостойных деревьев составляет не более 10 % от общего количества, что объясняется конкуренцией древесных пород и отпадом в тонкомерных ступенях толщины, в первую очередь из-за вытеснения сосны елью. В связи с этим при проектировании проходных рубок Ф.Н. Дружинин и др. (2023) [1] предлагают предусматривать рубку сосны из тонкомерных ступеней. При недостаточном количестве подроста сосны необходимо планировать содействие естественному возобновлению, а при его отсутствии необходимо стремиться к сохранению подпологовой ели для успешного формирования елового древостоя в будущем, что рекомендуют Зарубина и др. [12]. При условии сохранения елового подроста в дальнейшем можно сформировать еловое насаждение, которое обеспечит формирование хвойного древостоя без промежуточной смены на лиственный [2, 13].

Постоянные пробные площади прямоугольной формы закладывались с установкой столбов и определением географических координат углов с помощью GPS-навигатора с учетом отраслевого стандарта ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные» и разработанными на его основе рекомендациями5. На пробных площадях производился комплекс лесоводственно-таксационных работ. На каждой пробной площади проведен сплошной перечет всех деревьев с диаметрами свыше 6 см на высоте 1,3 м мерной вилкой с точностью 1 мм с разделением по породам и категориям технической годности. Для определения средней высоты древесного яруса замерялись высоты 12-15 деревьев из категории деловых, отобранных репрезентативно для всех ступеней толщины. У древесных пород с долей в составе менее 3 единиц высоты замеряли у 3–5 деревьев из трех центральных ступеней толщины. Для определения высот использовался ультразвуковой высотомер Haglof Vertex IV с точностью измерения ±0,1 м. Среднюю высоту преобладающей породы определяли по математическим моделям, а по другим породам – как среднюю арифметическую величину.

При перечете также фиксировались пороки и повреждения стволов (ошмыг коры, поранения древесины, поранения корневых лап, разрыв части корней), влияющие на товарную структуру и жизнеспособность деревьев, оставленных после

[4] Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации (Зарегистрировано в Минюсте России 29.09.2014 № 34186). Приказ Минприроды России от 18.08.2014 № 367 (ред. от 02.08.2023) – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590 (дата обращения: 05.02.2025)].

[5] Третьяков С. В., Коптев С. В., Наквасина Е. Н., Бахтин А. А., Ильинцев А. С., Богданов А. П., Кекишева Ю. Е. Лесная таксация. Часть 4. Закладка, таксация и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ: учебное пособие; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2023. – 119 с.

проведения рубки. Сухостойные деревья по породам учитывались отдельно. Средний возраст древостоя определялся по главной породе с помощью подсчета годичных колец на кернах, взятых у деревьев из средней ступени толщины.

По материалам сплошного перечета деревьев определяли таксационные характеристики древостоев с использованием нормативов, применяемых в районе исследования[6]. На этапе обработки экспериментальных данных применяли математические и статистические методы, которые позволили объективно оценить полученные результаты и сделать обоснованные выводы с определенной степенью достоверности. Все статистические анализы выполняли на 5 % уровне значимости, что считается достаточным для биологических исследований, что отражено в работе И.И. Гусева (2002) [7].

Для определения количества подроста проводился перечет на лентах шириной 2 м. При учете подрост разделяли по породному составу, категориям крупности, жизнеспособности. По жизнеспособности подрост подразделяли на жизнеспособный, поврежденный и не жизнеспособный. В зависимости от высоты подрост подразделяли на: мелкий (высотой до 0,5 м), средний (от 0,51 до 1,5 м), крупный (> 1,51 м) и до 6 см в диаметре на 1,3 метра от шейки корня.

Данные длительных наблюдений необходимы для создания и проверки прогнозных моделей формирования товарной структуры древостоя и способности выполнять экосистемные функции [14, 15, 16].

Результаты

Таксационные характеристики пробных площадей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика пробных площадей

Table 1

Inventory characteristic of study plots

№ | N	Год обследования | Year of survey	Класс бонитета | Bonitet class	Состав древостоя | Forest stand composition	Порода | Type of wood	Средние | Average			Полнота | Completeness		Запас, $м^3$/га | Stock, m^3/ha		Густота, шт./га | Quantity, pcs/ha
					возраст, лет | age, years	высота, м | height, m	диаметр, см | diameter, cm	абсолютная $м^2$/га | absolute, m^2/ha	относительная | relative	растущих | growing	сухих | dry	
1	2017	III	3С3Е2Б2Ос	С	75-80	19	16,4	7,6	0,22	69	3	334
				Е		10	11,2	8,5	0,42	51		762
				Б		17	14,3	4,3	0,16	33		237
				Ос		18	17,5	4,7	0,14	43		172
	Итого		-	-	-	-	-	25,1	0,94	196	3	1505
	2022	III	3С3Е3Ос1Б	С	80-85	19	17	8,0	0,23	73	5	335
				Е		11	10	10,9	0,50	66	2	1177
				Б		17	13	4,3	0,16	33		279
				Ос		19	19	6,4	0,18	61		191
	Итого		-	-	-	-	-	29,6	1,07	232	7	1982
2	2017	II	5С3Е1Б1Ос	С	70	19	17,0	11,5	0,33	106	4	462
				Е		12	11,4	9,9	0,42	66		862
				Б		15	13,1	2,7	0,11	19		171
				Ос		20	20,4	1,6	0,05	16		42
	Итого		-	-	-	-	-	25,8	0,91	207	4	1537

[6] Войнов Г.С. Лесотаксационный справочник по северо-востоку Европейской части Российской Федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской области и республики Коми). Архангельск, 2012, 672 с.

[7] Гусев, И. И. Моделирование экосистем: учебное пособие / И. И. Гусев. – Архангельск: изд-во АГТУ, 2002. – 112 с.

	2022	II	4С4Е1 Б1Ос	С	75	20	18	11,5	0,32	107	10	415
				Е		11	11	14,6	0,67	94		1362
				Б		15	14	3,3	0,13	24		190
				Ос		19	21	1,9	0,05	19		43
	Итого		-	-	-	-	-	31,3	1,17	244	10	2010
3	2017	II	5С2Е2 Б1Ос	С	70	20	18,1	12,6	0,35	120	2	439
				Е		11	9,8	7,6	0,35	44		912
				Б		16	14,8	7,8	0,30	57		389
				Ос		20	20,0	1,5	0,04	14		62
	Итого		-	-	-	-	-	29,5	1,04	235	2	1802
	2022	II	4С3Е2 Б1Ос	С	76	20	19	13,4	0,37	128	13	428
				Е		10	10	13,4	0,67	75	1	1694
				Б		18	15	8,1	0,29	65	6	411
				Ос		20	21	1,9	0,05	19		61
	Итого		-	-				36,9	1,38	287	20	2594
4	2017	II	3С3Е2 ЛЦ2Б	С	70	20	18,8	4,9	0,14	45	2	172
				Е		11	11,9	7,0	0,32	44		552
				Б		18	15,9	3,4	0,12	27		156
				Лц		20	15,1	2,6	0,07	20		145
	Итого		-	-	-	-	-	17,8	0,65	137	2	1025
	2022	II	2С4Е2 Лц2Б	С	75	21	19	4,7	0,13	45	2	156
				Е		11	11	12,0	0,55	76		1151
				Б		20	16	4,5	0,15	41		198
				Лц		22	15	3,6	0,1	34	3	203
	Итого		-	-	-			24,9	0,93	196	5	1708
5	2017	II	4С2Е2 Б2Ос+ Лц	С	75	22	22,8	8,6	0,22	87	4	180
				Е		13	14,9	7,1	0,28	49		375
				Б		22	25,5	4,5	0,14	42		95
				Ос		21	22,5	4,0	0,11	40		95
				Лц		22	24,0	1,0	0,03	8		20
	Итого		-	-	-	-	-	25,2	0,78	226	4	765
	2022	II	3С3Е2 Б2Ос+ Лц	С	80	23	24	9,0	0,23	91	4	170
				Е		15	16	8,8	0,31	68		415
				Б		27	29	5,3	0,16	54		95
				Ос		25	25	4,3	0,11	48		80
				Лц		26	25	1,1	0,03	11		20
	Итого		-	-	-			28,4	0,84	272	4	780
6	2017	II	8С2Е+ Ос	С	70	22,0	22,3	15,8	0,41	157	2	357
				Е		14,0	14,2	5,4	0,20	39		304
				Б		13,0	9,7	0,2	0,01	2		31
				Ос		15,0	12,6	0,8	0,02	6		57
				Лц		23,0	20,0	0,1	-	1		5
	Итого		-	-	-	-	-	22,3	0,64	205	2	754
	2022	II	7С3Е+ Ос, ед Лц, Б	С	75	22	23	16,8	0,25	169	4	348
				Е		16	17	7,6	0,02	61		322
				Б		13	10	0,4	0,03	3		48
				Ос		18	15	0,9	0,25	7		47
				Лц		26	24	0,2		2		4
	Итого		-	-	-			26,0	0,74	242	4	769

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Согласно таблице 1 динамика таксационных показателей исследуемых древостоев за период наблюдения свидетельствует о том, что все древостои находятся в фазе активного роста. На всех пробных площадях наблюдается увеличение доли ели на 1 единицу,

что связано с переходом крупного подроста в категорию древостоя и улучшением условий роста за счет удаления крупномерных стволов сосны. Значительный прирост объясняется улучшением условий роста и уменьшением суммы площадей сечений оставленной части древостоя непосредственно после рубки [17]. Для исследуемых насаждений характерен высокий класс бонитета – II-III. Отмечается увеличение средней высоты и диаметра у сосны. Средняя относительная полнота исследуемых насаждений составляет 1,0±0,1.

Общие запасы и приросты на пробных площадях, пройденных рубками ухода приведены в таблице 2. Согласно таблице 2 общий запас древостоев за 13 лет с момента проведения рубки увеличился на 68–140 м^3/га. Среднепериодический прирост за 8 и 13 лет после рубки значительно превышает аналогичные значения нормальных сосновых древостоев, приведенных в справочной литературе [5].

Изменение среднего объема ствола характеризует степень роста элементов древостоя в высоту и по диаметру. В таблице 3 приведены данные по средним объемам ствола на пробных площадях. Особенности роста в высоту и по диаметру [19], отражает результат реакции деревьев на изменившиеся условия роста. Путем проведения рубки сформированы оптимальные условия для дальнейшего роста и формирования древесных пород путем увеличения площади почвенного питания и светового режима.

Рост среднего объема сосны выявлен на всех пробных площадях. Согласно таблицы 1 отмечается увеличение густоты ели, что означает переход крупного подроста в древостой и отражается в снижении средних объемов стволов на 1,2,3 и 4 пробной площади.

Таблица 2

Общий запас древостоев на объектах, пройденных рубками ухода различной интенсивности

Table 2

The total stock of stands at sites that have undergone thinning of varying intensity

№ | N	Интенсивность рубки рубки, % | Thinning rate, %	Запас, м^3/га | Stock, m^3/ha			Прирост, м^3/га | Increment, m^3/ha		Среднепериодический прирост, м^3/га | Average periodic increment, m^3/ha	
		после рубки | after thinning	через 8 лет | after 8 years	через 13 лет | after 13 years	через 8 лет | after 8 years	через 13 лет | after 13 years	через 8 лет | after 8 years	через 13 лет | after 13 years
1	36	90	196	232	106	142	13,3	11,0
2	37	139	207	244	68	105	8,6	8,1
3	33	147	235	287	88	140	11,0	10,7
4	36	128	137	196	9	68	1,1	5,2
5	38	143	226	272	83	128	10,4	9,9
6	36	109	205	242	96	132	12,0	10,2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Средний объем ствола по породам

Table 3

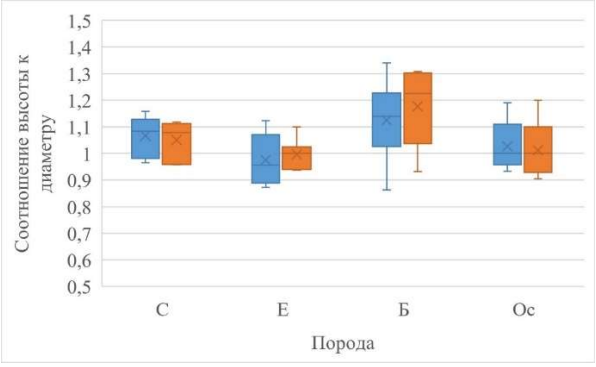
Average trunk volume by species

Год обследования | Year of survey	Средний объем хлыста, м^3				
	сосна обыкновенная | Scots pine	ель европейская | Norway spruce	береза повислая | drooping birch	осина | trembling poplar	Лиственница | larch
пп 1					
2017	0,20	0,067	0,140	0,250	
2022	0,219	0,056	0,117	0,319	
пп2					
2017	0,231	0,076	0,109	0,366	
2022	0,259	0,069	0,126	0,436	
пп 3					
2017	0,272	0,048	0,147	0,326	
2022	0,299	0,044	0,158	0,382	
пп4					
2017	0,265	0,080	0,172	-	0,151
2022	0,285	0,066	0,205	-	0,187
пп 5					
2017	0,479	0,128	0,440	0,415	0,433
2022	0,535	0,163	0,572	0,596	0,525
пп6					
2017	0,440	0,129	0,046	0,106	0,270
2022	0,485	0,189	0,055	0,151	0,420

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Для оценки устойчивости и состояния древостоев использовали отношение высоты к диаметру на высоте 1,3 м (H/D) [20]. Этот показатель является индикатором борьбы деревьев за жизненное пространство и свет. На рисунке 1 приведена динамика отношения высоты к диаметру на высоте 1,3 м (H/D) по породам за период наблюдения.



H/D через 8 лет после рубки

H/D через 13 лет после рубки

Рисунок 1 Динамика отношения H/D на пробных площадях

Figure 1. Dynamics of the H/D ratio in the sample areas

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Согласно рисунка 1 за исследуемый период наблюдается увеличение отношения H/D у ели и березы, что показывает усиление конкуренции и борьбы за свет. У сосны и осины (*Populus tremula* L.) отношение уменьшилось, что может говорить о том, что среди деревьев в верхнем ярусе прирост ствола идет в большей степени по диаметру чем в высоту.

Рациональное применение рубок положительно влияет на радиальный прирост древостоя [21]. Долгосрочные наблюдения за сосновыми насаждениями, которые пройдены рубками ухода, показали, что при правильном отборе деревьев для рубки запас древостоя не

снижается. Более того, такие рубки способствуют улучшению товарности насаждений, сокращению периода его восстановления и улучшению качественного состава древостоя [22, 23, 24].

Вопросы периодичности и интенсивности рубок являются актуальными в проводимых научных исследованиях. В различных условиях эффект от рубки может отличаться, поэтому необходимы прогнозные модели будущего развития насаждений после проходных рубок в различных насаждениях также учитывающие климатические изменения и экосистемные функции, выполняемые лесами [25, 26].

В.В. Иванов (2017) [27] отмечает, что при чрезмерно высокой интенсивности проводимых рубок, формируются древостои с густотой, меньше, чем оптимальная. В разреженном насаждении можно получить более высокие значения прироста оставляемых деревьев, однако это не означает максимальной производительности древостоя в целом.

На рисунке 2 приведена товарная структура древостоев за период наблюдения.

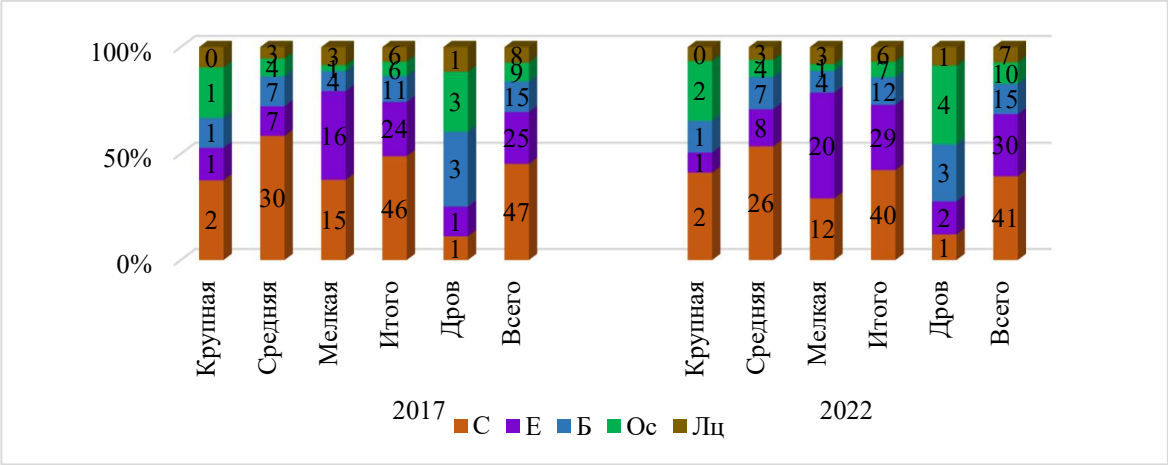
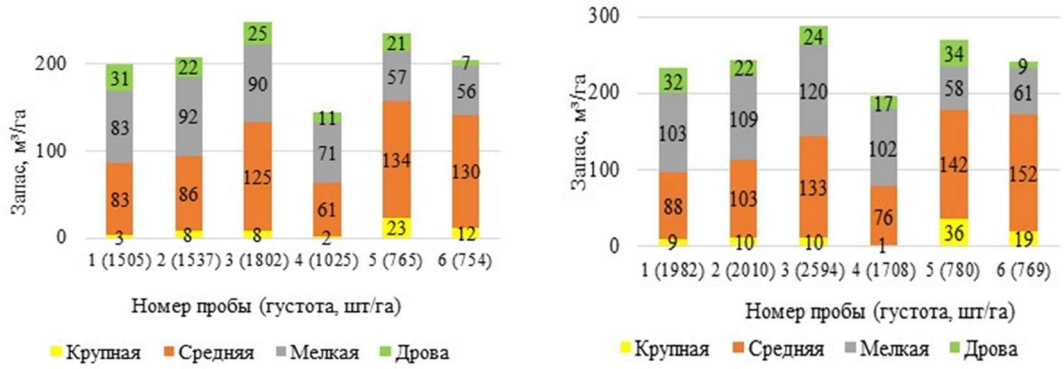


Рисунок 2. Товарная структура древостоев
Figure 2. Commodity structure of a stands
Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations



А Б

Рисунок 3. Товарная структура древостоев
Figure 3. Commodity structure of a stands
А – наблюдения в 2017 году;
Б – наблюдения в 2022 году.
Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

На рисунке 3 наглядно продемонстрировано, что на пробных площадях (1,2,3) с максимальным количеством деревьев - самые высокие значения запаса древесины. Тогда как наибольший запас средней и крупной древесины находится в древостоях с минимальным количеством деревьев, что согласуется с выводами о влиянии состава [28] и густоты древостоя [29] на выход крупномерной и средней древесины.

Обсуждение

После проведения проходных рубок товарная структура древостоя восстанавливается достаточно быстро. В рассматриваемых древостоях товарная структура за 5-летний период наблюдений практически не изменилась.

Динамика таксационных показателей исследуемых древостоев за 13-летний период свидетельствует о том, что все рассматриваемые древостои находятся в фазе активного роста. В составе насаждений произошли небольшие изменения, на всех пробных площадях наблюдается увеличение еловой части древостоя, что связано с переходом крупного подроста в категорию древостоя и увеличение светового прироста. Относительная полнота суммарно по всем составляющим породам в исследуемых насаждениях в среднем равняется 1,0. Сумма площадей сечений древостоев за 13-летний период наблюдений выросла в среднем на 5,2 м^2/га.

Текущий периодический прирост запаса по породам составляет: сосна – 0,2–2,4 м^3/га, ель – 3,0–6,4 м^3/га, береза – 0,2–2,4 м^3/га, осина – 0,2–3,6 м^3/га, лиственницы (*Larix sukaczewii* Dylis) – 0,2–2,8 м^3/га

Проведенные наблюдения на постоянных пробных площадях за через 8 и 13 лет после проходных рубок показывают увеличение всех таксационных показателей древостоя. Полученные результаты в целом согласуются с данными аналогичных исследований других авторов [28, 29].

Заключение

Проведенные исследования демонстрируют, что проходные рубки в смешанных насаждениях являются эффективным инструментом повышения продуктивности лесов и интенсификации ведения лесного хозяйства.

Установлена прямая зависимость прироста средней и крупной древесины от густоты древостоя, при этом максимальная продуктивность достигается при наибольшей густоте. Что говорит о том, что необходимо соблюдать баланс продуктивности и целевой товарной структуры древостоя.

Экономическая целесообразность проходных рубок определяется рыночной востребованностью балансовой древесины и наличием технологий переработки мелкотоварной древесины. Кроме того, проходные рубки позволяют управлять структурой древостоя, стимулировать рост подпологовой ели и повышать продуктивность насаждений за счет формирования многоярусных древостоев.

Важным преимуществом проходных рубок является их комплексное воздействие на лесные экосистемы. Они позволяют целенаправленно формировать структуру древостоя и создавать продуктивные многоярусные насаждения. Одновременно такие рубки способствуют повышению устойчивости лесов к биотическим факторам и адаптации насаждений к изменяющимся климатическим условиям.

Список литературы

1. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н., Васильева О.А., Корякина Д.М., Цыпилев С.В. Особенности и лесоводственная эффективность проходных рубок в осушаемых лесах. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – №. 242. – С. 28-42. DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.242.28-42
2. Сурина Е.А., Минин Н.С. Формирование смешанных сосново-березовых насаждений со вторым ярусом ели под влиянием рубок ухода. Сибирский лесной журнал. – 2023. – №. 2. – С. 26-32. DOI: https://doi.org/10.15372/SJFS20230203
3. Тетюхин С.В., Павская М.В. Общая оценка естественного лесовозобновления по преобладающим породам, типам леса и типам лесорастительных условий на территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества Ленинградской области. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. –

№. 235. – С. 71-83. DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.235.71-83

4. Power H., Tremblay S., Auger I., Duchateau E. Effects of commercial thinning on characteristics of naturally regenerated coniferous stands from Eastern North-America. Canadian Journal of Forest Research. 2024; 54(9): 1003–1017. DOI: https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0009
5. Nikooy M., Tavankar F., Naghdi R., Ghorbani A., Jourgholami M., Picchio R. Soil impacts and residual stand damage from thinning operations. International Journal of Forest Engineering. 2020; 31(3): 126-137. DOI: https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1744954
6. Tavankar F., Bonyad A.E., Nikooy M., Picchio R., Venanzi R., Calienno L. Damages to soil and tree species by cable-skidding in Caspian forests of Iran. For. Syst. 2017; 26(1): 1-9. DOI: https://doi.org/10.5424/fs/2017261-09100
7. Sirén M. Tree Damage in Single-Grip Harvester Thinning Operations. Journal of Forest Engineering. 2001; 12(1): 29-38.
8. Bertolotto P., Calienno L., Conforti M., D'Andrea E., Lo Monaco A., Magnani E., Marinšek A., Micali M., Picchio R., Sicuriello F., Spina R., Venanzi R. Assessing indicators of forest ecosystem health. Ann. Silvi. Res. 2016; 40(1): 64-69.
9. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands. Current Forestry Reports. 2020; 6: 115–128. DOI: https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8
10. Ильинцев А.С., Шамонтьев И.Г., Третьяков С.В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области). Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11 – №.3 (43). – С. 45-62. DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4
11. Hiltunen M., Strandman H., Kilpeläinen A. Optimizing forest management for climate impact and economic profitability under alternative initial stand age structures. Biomass and Bioenergy. 2021; 147: 106027. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.10602
12. Зарубина Л.В., Карбасников А.А., Пешин Д.А. Оценка возобновительных процессов под пологом приспевающих хвойных древостоев в Вологодской области. Лесной вестник. – 2021. – Т. 25(2). – С. 10-18. DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-10-18
13. Корчагов С.А., Минин Н.С., Сурина Е.А., Гоголева Л.Г. Воспроизводство хвойных древостоев комплексными рубками. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – №. 246. – С. 152-161. DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.152-161
14. Pikkarainen L., Strandman H., Vento E., Petty A., Tikkanen O.-P., Kilpeläinen A., Peltola H. Effects of forest conservation and management on timber, ecosystem carbon, dead wood and habitat suitability area in a boreal forest under climate change. Silva Fennica. 2024; 58(2): 23045. DOI: https://doi.org/10.14214/sf.23045
15. Kellomäki S., Strandman H., Kirsikka-Aho S., U F Kirschbaum M., Peltola H. Effects of thinning intensity and rotation length on albedo- and carbon stock-based radiative forcing in boreal Norway spruce stands. Forestry: An International Journal of Forest Research. 2023; 96 (4): 518-529. DOI: https://doi.org/10.1093/forestry/cpac058
16. Heinonen T., Pukkala T., Antti A. Variation in forest landowners' management preferences reduces timber supply from Finnish forests. Annals of Forest Science. 2020; 77: 31. DOI: https://doi.org/ 10.1007/s13595- 020- 00939-z
17. Makinen H., Isomaki A. Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. Forest Ecology Management. 2004; 201(2–3): 311-325. DOI: https://doi.org/10.1016/j. foreco.2004.07.016.
18. Kellomäki S., Väisänen H., U F Kirschbaum M., Kirsikka-Aho S., Peltola H. Effects of different management options of Norway spruce on radiative forcing through changes in carbon stocks and albedo. Forestry: An International Journal of Forest Research. 2021; 94(4): 588-597. DOI: https://doi.org/10.1093/forestry/cpab010
19. Собачкин Р.С., Собачкин Д.С., Петренко А.Е. Особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев различного ценотического статуса. Сибирский лесной журнал. –2022. – №. 3. – С. 34-39. DOI: 10.15372/SJFS20220304

20. Кузьмичев В.В., Каплина Н.Ф. Оценка древесины, выбираемой при рубках ухода в сосняках хвойно-широколиственной зоны. Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2017. – №. 2(34). – С. 5-14. DOI: https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.2.5
21. Попов О.С., Третьяков С.В., Новоселов А.С. Лесоводственная эффективность проведения несплошной лесозаготовки древесины в сосняках после гидротехнической мелиорации в Сокольском районе Вологодской области. Лесотехнический журнал. – 2023. – Т.13. – №4 (52). – С. 72-91. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/5
22. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests. Journal of Forestry Research. 2022; 33 (4): 1145-1156. DOI: doi.org/10.1007/s11676-021-01415-8
23. Крюк В.И., Магасумова А.Г., Пульников А.П., Залесова Е.С. Лесоводственная эффективность рубок ухода в сосняках национального природного парка "Припышминские боры". Аграрный вестник Урала. – 2009. – Т. 8(62). – С. 103-105. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18639576
24. Kellomäki S. Commercial Thinning and Selective Cutting with Impacts on Forest Carbon. In: Forest Management for Timber Production and Climate Change Mitigation. Managing Forest Ecosystems. Springer, Cham, 2024; 44: 271-310. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71575-4_10
25. Simon D-C., Ameztegui A. Modelling the influence of thinning intensity and frequency on the future provision of ecosystem services in Mediterranean mountain pine forests. European Journal of Forest Research. 2023; 142 (4): 521-535. DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-023-01539-y
26. Garcia-Gonzalo J., Peltola H., Briceño-elizondo E., Kellomaki S. Changed thinning regimes may increase carbon stock under climate change: A case study from a Finnish boreal forest. Climatic Change. 2007; 81: 431-454. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-006-9149-8
27. Иванов В.В., Борисов А.Н., Петренко А.Е., Семенякин Д.А., Собачкин Д.С., Собачкин Р.С. Густота сосновых древостоев при интенсивном лесовыращивании. Сибирский лесной журнал. – 2017. – №. 6. – С. 102-109. DOI: https://doi.org/10.15372/SJFS20170608
28. Данилов Д.А., Беляева Н. В., Зайцев Д. А., Анисимова И. М. Таксационные показатели и товарная структура спелых смешанных древостоев сосны и ели в зеленомошных типах леса // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т.12. – №. 2 (46). – С. 14–29. DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/2
29. Сырников И.А. Сортиментная структура вырубаемой части сосновых насаждений при проведении проходных рубок в Ленинградской области. Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 689. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=20992785

References

1. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N., Vasilyeva O.A., Koryakina D.M., Tsypilev S.V. Osobennosti i lesovodstvennaya effektivnost' prohodnyh rubok v osushaemyh leash. [Peculiarities and silvicultural efficiency of passing cuttings in drained forests]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii = The Journal «Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii». 2023; 242: 28-42. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.242.28-42
2. Surina E. A., Minin N. S. Formirovanie smeshannyh sosnovo-berezovyh nasazhdenij so vtorym yarusom eli pod vliyaniem rubok uhoda. [Formation of mixed pine-birch stands with a second storey of spruce under the influence of thinning]. Sibirskij Lesnoj Zurnal = Siberian Journal of Forest Science. 2023; 2: 26–32 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.15372/SJFS20230203
3. Tetyukhin S.V., Pavskaya M.V. Obshchaya ocenka estestvennogo lesovozobnovleniya po preobladayushchim porodam, tipam lesa i tipam lesorastitel'nyh uslovij na territorii Lisinskoj chasti Uchebno-opytnogo lesnichestva Leningradskoj oblasti. [General assessment of natural reforestation by the prevailing species, types of forest and types of growing conditions on the territory of the Lisinsky part of the Leningrad Region Training and Experimental Forestry]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii= The Journal «Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii». 2021; 235:71-83. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.235.71-83
4. Power H., Tremblay S., Auger I., Duchateau E. Effects of commercial thinning on characteristics of naturally regenerated coniferous stands from Eastern North-America. Canadian Journal of Forest Research. 2024; 54(9): 1003–1017.

DOI: https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0009
5. Nikooy M., Tavankar F., Naghdi R., Ghorbani A., Jourgholami M., Picchio R. Soil impacts and residual stand damage from thinning operations. International Journal of Forest Engineering. 2020; 31(3): 126-137. DOI: https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1744954
6. Tavankar F., Bonyad A.E., Nikooy M., Picchio R., Venanzi R., Calienno L. Damages to soil and tree species by cable-skidding in Caspian forests of Iran. For. Syst. 2017; 26(1): 1-9. DOI: https://doi.org/10.5424/fs/2017261-09100
7. Sirén M. Tree Damage in Single-Grip Harvester Thinning Operations. Journal of Forest Engineering. 2001; 12(1): 29-38.
8. Bertolotto P., Calienno L., Conforti M., D'Andrea E., Lo Monaco A., Magnani E., Marinšek A., Micali M., Picchio R., Sicuriello F., Spina R., Venanzi R. Assessing indicators of forest ecosystem health. Ann. Silvi. Res. 2016; 40(1): 64-69.
9. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands. Current Forestry Reports. 2020; 6: 115–128. DOI: https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8
10. Ilintsev A.S., Shamontev I.G., Tretyakov S.V. Sovremennaya dinamika lesopol'zovaniya v boreal'nyh lesah Rossii (na primere Arhangel'skoj oblasti). [Modern dynamics of forest use in the boreal forests of Russia (for example of the Arkhangelsk region)]. Lesotekhnicheskii zhurnal = Forest Engineering journal. 2021; 11(3(43)): 45-62 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/4
11. Hiltunen M., Strandman H., Kilpeläinen A. Optimizing forest management for climate impact and economic profitability under alternative initial stand age structures. Biomass and Bioenergy. 2021; 147: 106027. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.10602
12. Zarubina L.V., Karbasnikov A.A., Peshin D.A. Otsenka vozobnovitel'nykh protsessov pod pologom prispevayushchikh khvoynykh drevostoev v Vologodskoy oblasti. [Renewable processes under maturing coniferous stands crown in Vologda region]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin. 2021; 25(2); 10-18. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-10-18
13. Korchagov S.A., Minin N.S., Surina E.A., Gogoleva L.G. Vosproizvodstvo hvojnyh drevostoev kompleksnymi rubkami. [Reproduction of coniferous stands Complex logging]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii. 2023; 246:152-161. (In Russ.) https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.152-161
14. Pikkarainen L., Strandman H., Vento E., Petty A., Tikkanen O.-P., Kilpeläinen A., Peltola H. Effects of forest conservation and management on timber, ecosystem carbon, dead wood and habitat suitability area in a boreal forest under climate change. Silva Fennica. 2024; 58(2): 23045. DOI: https://doi.org/10.14214/sf.23045
15. Kellomäki S., Strandman H., Kirsikka-Aho S., U F Kirschbaum M., Peltola H. Effects of thinning intensity and rotation length on albedo- and carbon stock-based radiative forcing in boreal Norway spruce stands, Forestry: An International Journal of Forest Research. 2023; 96(4): 518-529, DOI: https://doi.org/10.1093/forestry/cpac058
16. Heinonen T., Pukkala T., Antti A. Variation in forest landowners' management preferences reduces timber supply from Finnish forests. Annals of Forest Science. 2020; 77: 31. DOI: https://doi.org/10.1007/s13595-020-00939-z.
17. Makinen H., Isomaki A. Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. For. Ecol. Manag. 2004; 201(2–3): 311-325. DOI: https://doi.org/10.1016/j. foreco.2004.07.016.
18. Kellomäki S., Väisänen H., U F Kirschbaum M., Kirsikka-Aho S., Peltola H. Effects of different management options of Norway spruce on radiative forcing through changes in carbon stocks and albedo, Forestry: An International Journal of Forest Research. 2021; 94(4): 588-597. DOI: https://doi.org/10.1093/forestry/cpab010
19. Sobachkin R.S., Sobachkin D.S., Petrenko A.E. Osobennosti rosta i produktivnosti sosnovyh molodnjakov, sformirovannyh iz derev'ev razlichnogo cenoticheskogo statusa. [The specifics of growth and productivity of young pine stands, formed of the trees of the different cenotic position]. Sibirskij Lesnoj Zurnal = Siberian Journal of Forest Science. 2022; 3: 34-39. (In Russ.). DOI: 10.15372/SJFS20220304.
20. Kuzmichev V.V., Kaplina N.F. Ocenka drevesiny, vybiraemoj pri rubkah uhoda v sosnyakah hvojno-shirokolistvennoj zony [Evaluation of Wood Selected by Thinning in Pine Forests of the Coniferous Broad-Leaved Zone]. Vestnik PGTU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2017; 2(34): 5-14. (In Russ.). DOI: 10.15350/2306-2827.2017.2.5

21. Popov O.S., Tretyakov S.V., Novoselov A.S. Lesovodstvennaja jeffektivnost' provedenija nesploshnoj lesozagotovki drevesiny v sosnjakah posle gidrotehnicheskoj melioracii v Sokol'skom rajone Vologodskoj oblasti. [Silvicultural efficiency of the partial cut in pine forests after hydro technical reclamation in the Sokolsky district of the Vologda region]. Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal, 2023; 13(4(52)): 72-91. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/5.
22. Grigoreva, O., Runova, E., Savchenkova, V. et al. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests. J. For. Res. 2022; 33. 1145-1156. DOI: doi.org/10.1007/s11676-021-01415-8
23. Krjuk V., Magasumova A., Pul'nikov A., Zalesova E. Lesovodstvennaja jeffektivnost' rubok uhoda v sosnjakah nacional'nogo prirodnogo parka "Pripyshminskie bory". [Forestry effektiveness thinning operations piny stands in park "Pripishminske bori"]. Agrarnyj vestnik Urala = Agrarian bulletin of the Urals. 2009; 8(62): 103-105. (In Russ.).
24. Kellomäki S. Commercial Thinning and Selective Cutting with Impacts on Forest Carbon. In: Forest Management for Timber Production and Climate Change Mitigation. Managing Forest Ecosystems. 2024; 44. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71575-4_10
25. Simon D.C., Ameztegui A. Modelling the influence of thinning intensity and frequency on the future provision of ecosystem services in Mediterranean mountain pine forests. Eur J Forest Res 142, 521–535 (2023). DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-023-01539-y
26. Garcia-Gonzalo J., Peltola H., Briceño-elizondo E. et al. Changed thinning regimes may increase carbon stock under climate change: A case study from a Finnish boreal forest. Climatic Change 2007; 81: 431–454. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-006-9149-8
27. Ivanov V.V., Borisov A.N., Petrenko A.E., Semenyakin D.A., Sobachkin D.S., Sobachkin R.S. Gustota sosnovyh drevostoev pri intensivnom lesovyrashhivanii [The density of pine stands under intensive forest growing]. Sibirskij Lesnoj Zurnal. [Siberian Journal of Forest Science]. 2017. 6: 102-109. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15372/SJFS20170608
28. Danilov D. A., Beliaeva N. V., Zaytsev D. A., Anisimova I. M. Taksacionnye pokazateli i tovarnaya struktura spelyh smeshannyh drevostoev sosny i eli v zelenomoshnyh tipah lesa [Taxation characteristics and commodity structure of mature pine and spruce mixed stands in green-moss forest types]. Lesotekhnicheskii zhurnal = Forest Engineering journal. 2022; 12(2(46)): 14-29 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/2
29. Syrnikov I.A. Sortimentnaya struktura vyrubaemoj chasti sosnovyh nasazhdenij pri provedenii prohodnyh rubok v Leningradskoj oblasti [Assortment structure of cutting peace of pine plantations during realization of commercial thinning in the Leningrad region]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education. 2013; 5: 689. (In Russ.) https://elibrary.ru/item.asp?id=20992785

Сведения об авторах

✉ *Богданов Александр Петрович* – канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13. г. Архангельск, Российская Федерация, 163062, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1655-7212, e-mail: aleksandr_bogd@mail.ru.

Ильинцев Алексей Сергеевич – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Российская Федерация, 163062, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3524-4665, e-mail: a.ilintsev@narfu.ru.

Третьяков Сергей Васильевич – д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13. г. Архангельск, 163062, Российская Федерация, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Сев. Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5982-3114, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Коптев Сергей Викторович – д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13. г. Архангельск, 163062, Российская Федерация, профессор, зав. кафедрой лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5402- 1953, e-mail: s.v.koptev@narfu.

Information about the authors

✉ *Alexander P. Bogdanov* – Cand. Sci. (Agriculture), Senior researcher of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Associate professor, Department of Silviculture and Forest Management, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina emb., 17, Arkhangelsk, Russian Federation, 163002,Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1655-7212, e-mail: aleksandr_bogd@mail.ru.

Aleksey S. Ilintsev – Cand. Sci. (Agric.), Senior researcher of Northern Research Institute of Forestry, Nikitov str., 13, Arkhangelsk, Russian Federation, 163062, Associate professor, Department of Silviculture and Forest Management, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina emb., 17, Arkhangelsk, Russian Federation, 163002, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3524-4665, e-mail: a.ilintsev@narfu.ru.

Sergey V. Tretyakov – Dr. Sci. (Agriculture), Chief Scientific Officer of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13. Arkhangelsk, 163062, Russian Federation, Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, embankment of the Northern Dvina, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5982-3114, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Sergey V. Koptev – Dr. Sci. (Agriculture), Chief Scientific Officer of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation, Professor, Head of the Department of Forestry and Forest Management, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, embankment of the Northern Dvina, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5402-1953, e-mail: s.v.koptev@narfu.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/3
УДК: 630*32.4/.236.4(477.61)

Влияние густоты древостоя и освещенности на естественное возобновление в полезащитных лесополосах Луганской Народной Республики

Олеся В. Грибачева[1], kafles@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5428-143X
Юлия В Гаврилюк[2] , juliagavriluk2023@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3897-3222
Юрий В. Копец[2], Yura_87-87@mail.ru

[1]*ФГБОУ ВО «Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова», квартал Аграрный, д.1, г.о. город Луганск, 291008, Луганская Народная Республика*
[2]*ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля» «Институт гражданской защиты», ул. Тухачевского, 11г, учебный корпус №12, г. Луганск, 291034, Луганская Народная Республика*
[2]*ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля» «Институт гражданской защиты», ул. Тухачевского, 11г, учебный корпус №12, г. Луганск, 291034, Луганская Народная Республика*

В работе представлены результаты изучения возобновления основных лесообразующих пород в полезащитных лесополосах хозяйства ГУП ЛНР «Агрофонд», которое расположено в Артемовском районе города Луганска. Цель работы – оценить состояние подроста древесно-кустарниковой растительности полезащитных лесополос и выявить факторы, влияющие на её развитие. При исследовании использовалась методика, применяемая в лесной таксации и методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов. Определение влажности почвы проводили термостато-весовым методом. Сбор опада проводился с пяти опадоуловителей, они размещались в лесополосе в случайном порядке. Количественный и качественный состав подроста в полезащитных лесополосах изучали методом круговых учётных площадок площадью 10 м^2 каждая (радиус 1,78 м). В первой полезащитной лесополосе было заложено 10 круговых учётных площадок, во второй - 10 шт., а в третьей - 18 шт. При анализе подроста лесообразующих пород установлено, что древесно-кустарниковая растительность на пробных учётных площадках представлена *Fraxinus excelsior* L., *Prunus mahaleb* L., *Pyrus communis* L., *Ulmus parvifolia* Jacq., *Lonicera tatarica* L., *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Acer tataricum* L., *Ligustrum vulgare* L. Выявлено, что по количественному составу на первой и второй полезащитных лесополосах преобладает подрост *Prunus mahaleb* L., а именно, первая полезащитная лесополоса – 72 шт. и вторая – 33 шт. Тогда как на третьей полезащитной лесополосе преобладает подрост *Acer tataricum* L. – 46 шт. Благонадёжный подрост *Quercus robur* L. встречается при суммарном освещении от 6250 до 5850 лк, а сомнительный – при освещении 3500 лк. В статье обосновывается мысль о том, что при густоте древостоя от 208 до 286 шт./га (средняя густота) самосева дуба черешчатого не наблюдается. При повышении древостоя от 298-327 шт./га (средняя густота) до 426 шт./га (густой древостой) состояние самосева дуба черешчатого по жизненному состоянию благонадёжное. При густом древостое (783 шт./га) состояние самосева по жизненному состоянию сомнительное. Освещённость и густота древостоя взаимосвязаны между собой и влияют на жизненное состояние самосева всех древесно-кустарниковых пород, произрастающих на учётных площадках, в то время как влажность почвы и масса листового опада больше влияют на прорастание их семян. Во всех трёх полезащитных лесополосах происходит накопление влаги по сравнению с контролем (открытое пространство), которая

задерживается корнями древесно-кустарниковой растительности. Однако, влаги в почве полезащитных лесополос недостаточно для успешного возобновления самосева.

Ключевые слова: *Луганская Народная Республика, лесовозобновление, подрост, густота древостоя, листовой опад*

Финансирование: данное исследование не получило внешнего финансирования.

Благодарности: автор благодарит за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Грибачева О. В., Гаврилюк Ю.В., Копец Ю.В. Влияние густоты древостоя и освещенности на естественное возобновление в полезащитных лесополосах Луганской Народной Республики Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 39-57. – *Библиогр.: с. 54-57 (21 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/3.

Поступила 02.10.2025. ***Пересмотрена*** 25.11.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Influence of tree growth density and illumination on natural regeneration in protective forest belt of the Lugansk People's Republic

Olesya V. Gribacheva[1], kafles@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5428-143X

Yulia V. Gavriluk[2] , juliagavriluk2023@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3897-3222

Yuri V. Kopets[2], Yura_87-87@mail.ru

[1]*Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov, Agrarian quarter, 1, city of Lugansk, 291008, Lugansk People's Republic*

[2]*Federal State budgetary educational institution of higher education «Lugansk Vladimir Dahl state University» «Institute of Civil Protection», 11g Tukhachevskogo Street, Building 12, Lugansk, 291034, Lugansk People's Republic*

[2]*Federal State budgetary educational institution of higher education «Lugansk Vladimir Dahl state University» «Institute of Civil Protection», 11g Tukhachevskogo Street, Building 12, Lugansk, 291034, Lugansk People's Republic*

Abstract

The paper presents the results of studying the renewal of the main forest-forming species in the field-protecting forest belts of the State Unitary Enterprise of the Lugansk People's Republic "Agrofond", which is located in the Artemovskiy district of the city of Lugansk. The purpose of the work is to assess the condition of the undergrowth of woody and shrubby vegetation in the field-protecting forest belts and to identify the factors affecting its development. The study used the methodology used in forest taxation and the methodology of systemic studies of forest-agricultural landscapes. The soil moisture was determined using the thermostatic-weight method. The litter was collected from five litter catchers, which were placed in the forest belt in a random order. The quantitative and qualitative composition of the undergrowth in the field-protecting forest belts was studied using circular counting plots with an area of 10 m^2 each (radius of 1.78 m). In the first field-protecting forest belt, 10 circular counting plots were established, in the second, 10 plots, and in the third, 18 plots. The analysis of undergrowth of forest-forming species revealed that the woody and shrubby vegetation on the test sites is represented by *Fraxinus excelsior* L., *Prunus mahaleb* L., *Pyrus communis* L., *Ulmus parvifolia* Jacq., *Lonicera tatarica* L., *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Acer tataricum* L., and *Ligustrum vulgare* L. It was revealed that the quantitative composition of the first and second field-protecting forest belts is dominated by the undergrowth of *Prunus mahaleb* L., namely, the first field-protecting forest belt has 72 specimens,

and the second has 33 specimens. On the other hand, the third field-protecting forest belt is dominated by the undergrowth of *Acer tataricum* L. – 46 specimens. A reliable *Quercus robur* L. juvenile is found in a total illumination of 6250 to 5850 lx, and a questionable one is found in an illumination of 3500 lx. The article substantiates the idea that there is no self-sowing of the sweet cherry oak when the density of the stand is between 208 and 286 trees per hectare (average density). When the tree density increases from 298-327 trees/ha (medium density) to 426 trees/ha (dense tree density), the condition of the self-sown sweet cherry oak is good. In dense stands (783 trees/ha), the vitality of the self-sown seedlings is questionable. The light intensity and density of the stand are interrelated and affect the vitality of the self-sown seedlings of all tree and shrub species in the study areas, while soil moisture and leaf litter mass have a greater impact on seed germination. In all three field-protecting forest belts, there is an accumulation of moisture compared to the control (open space), which is retained by the roots of the tree and shrub vegetation. However, there is not enough moisture in the soil of the field-protecting forest belts for successful self-sowing.

Keywords: *Lugansk People's Republic, reforestation, undergrowth, stand density, leaf litter*

Funding: This study received no external funding.
Acknowledgements: The author thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.
Conflict of interest: The author stated that there was no conflict of interest.

For citation: Gribacheva O.V., Gavriluk Yu.V., Kopets Yu.V. (2025) Influence of tree growth density and illumination on natural regeneration in protective forest belt of the Lugan People's Republic. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 39-57 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/3.

Received 02.10.2025/ ***Revised*** 25.11.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Полезащитные лесополосы играют ключевую роль в агролесоландшафтах, обеспечивая защиту почв от эрозии, улучшение микроклимата и сохранение биоразнообразия. Долговременная устойчивость этих насаждений напрямую зависит от процессов естественного возобновления, которые определяются комплексом факторов, среди которых густота древостоя и режим освещенности являются ключевыми.

Плотность древесного стоя, или количество деревьев на единицу площади, существенно влияет на процессы естественного возобновления в полезащитных лесополосах. Высокая плотность стоя может способствовать конкуренции между деревьями за свет, воду и питательные вещества, что может замедлить процесс естественного возобновления. С другой стороны, оптимальная плотность может создать условия для успешного роста молодых деревьев, обеспечивая им необходимое количество ресурсов. Кроме того, плотность древесного стоя влияет на микроклимат в лесополосах, что также может оказывать влияние на восстановление растительности. Например, более густые лесополосы могут создавать более влажные условия, способствующие росту определенных видов растений. Изучение этих факторов важно для разработки эффективных стратегий управления лесами и сохранения экосистем, что в свою очередь может помочь в борьбе с изменением климата и поддержании устойчивости природных ресурсов.

Световой режим представляет собой один из доминирующих факторов, определяющих процессы роста и развития растений в лесных экосистемах. Фотосинтез как фундаментальный физиологический процесс напрямую зависит от интенсивности и спектрального состава света. В условиях лесного полога свет приобретает исключительную гетерогенность, создавая мозаику микросайтов с различными условиями для возобновления.

Спектральный состав света играет регулирующую роль в различных аспектах развития растений. Как отмечают исследователи, синий и фиолетовый спектр ответственны за формирование крепких стеблей и густой листвы, в то время как красный свет служит сигналом к цветению и плодоношению. Это имеет важное значение

для естественного возобновления, поскольку различные виды демонстрируют разную чувствительность к спектральным характеристикам света.

Фотопериодизм - реакция растений на продолжительность светового дня - определяет фенологические ритмы развития многих древесных видов. Различают короткодневные, длиннодневные и нейтральные виды, что необходимо учитывать при оценке перспективности естественного возобновления в конкретных световых условиях. Свет влияет не только на процессы фотосинтеза, но и на морфогенез растений. При одностороннем освещении наблюдается эксцентричное развитие стволов, что снижает технические качества древесины и может иметь значение для формирования устойчивых насаждений с оптимальными защитными функциями в условиях полезащитных лесополос.

Густота древостоя выступает интегральным показателем, определяющим интенсивность конкурентных отношений между деревьями за ресурсы, включая свет, влагу и питательные вещества. Многочисленные исследования подтверждают существенное влияние этого фактора на процессы естественного возобновления.

Kholdaenko et al. (2022) [1] в исследовании на плантациях Picea obovata в Центральной Сибири установили, что начальная плотность посадки значимо влияет на динамику роста деревьев. Авторы выявили, что средний диаметр дерева демонстрировал постоянную негативную аллометрическую зависимость от густоты древостоя в возрасте 20, 25 и 35 лет, тогда как высота дерева значимо зависела от густоты только до 35-летнего возраста. При этом продуктивность на уровне дерева отрицательно коррелировала с густотой, в то время как продуктивность на уровне древостоя была положительно связана с ней.

Аналогичные закономерности были выявлены Tymińska-Czabańska et al. (2022) [2] при изучении роста сосны обыкновенной с использованием повторных данных воздушного лазерного сканирования. Исследователи показали, что более высокая густота стимулировала рост деревьев, особенно на продуктивных участках, демонстрируя прирост высоты около 10%.

Liu et al. (2022) [3] в естественных смешанных елово-пихтово-широколиственных лесах выявили, что индекс плотности древостоя является наиболее значимым предиктором прироста базальной площади, что указывает на доминирующую роль конкурентных отношений в ограничении продуктивности. Dubenyok & Lebedev (2022) [4] и другие авторы [5-7] в длительных наблюдениях за сосновыми насаждениями различной начальной густоты установили, что в более густых древостоях смыкание крон и формирование лесного полога происходят раньше, а максимальные объемные запасы достигаются в более раннем возрасте.

Световой режим под пологом лесных насаждений напрямую зависит от густоты древостоя, архитектуры крон и видового состава. Это взаимодействие определяет условия для естественного возобновления.

Грабарник и соавт. [8] в разработке световой модели для пространственно-явных моделей лесных насаждений подчеркивает, что свет является доминирующим фактором во многих экосистемах, а его доступность в подпологовом пространстве крайне гетерогенна.

Процессные модели основаны на механистическом описании эколого-физиологических процессов в лесных экосистемах. Они воспроизводят причинно-следственные связи биологических процессов через уравнения фотосинтеза и дыхания, используя как упрощенные физиологические зависимости, так и эмпирические функции нетто-продуктивности. Важным преимуществом этих моделей является возможность интеграции с почвенными модулями, что позволяет оценивать динамику органического вещества почв, эмиссию углекислого газа и баланс питательных элементов.

Расширенная функциональность процессных моделей включает расчет гидротермических условий и моделирование динамики травяно-кустарничкового яруса. Это обеспечивает комплексное представление о функционировании лесной экосистемы и конкурентных взаимодействиях между растениями за ресурсы. Способность учитывать влияние изменяющихся природных условий делает эти модели особенно ценными для прогнозирования реакции лесных экосистем на климатические изменения.

Различные виды древесных растений демонстрируют стратегические адаптации к условиям освещенности. Cheng et al. (2023) [9] в обзоре по подлесочной растительности отмечают, что низкая доступность света в подлеске обычно рассматривается как стресс для саженцев деревьев, ограничивающий их чистое накопление углерода и рост. Теневыносливые породы успешно возобновляются при наличии бокового или сквозного освещения, в то время как для светолюбивых пород необходимо верхнее освещение или его комбинация с боковым.

Патент RU2081557C1 (2021) [10] предлагает способ оценки естественного возобновления леса, основанный на определении относительного периода угнетения, вычисляемого как отношение возраста подроста к возрасту спелого насаждения. Этот подход позволяет оценить перспективность естественного возобновления и принять обоснованное решение о сохранении подроста при проведении рубок. Преимуществом данного метода является учет не абсолютного, а относительного возраста подроста, что делает оценку более надежной в различных лесорастительных условиях.

Современные исследования все чаще используют технологию дистанционного зондирования для оценки параметров лесных насаждений. Tymińska-Czabańska et al. (2022) [11] демонстрируют эффективность использования повторных данных воздушного лазерного сканирования для разработки моделей роста высоты с учетом густоты древостоя. Morin et al. (2023) [12] в своей статье подчеркивают важность инновационных методов инвентаризации для мониторинга и реагирования на глобальные изменения с целью повышения устойчивости и продуктивности лесов, отмечая, что такие методы могут сократить время сбора данных на 40%, повышая эффективность мониторинга.

Исследование Chekanyshkin (2024) [13] по росту и состоянию дуба черешчатого в смешанных защитных лесных насаждениях демонстрирует важность способов посадки для последующего развития древостоев. Установлено, что в сплошной рядной посадке количество живых дубов на 35,6-52,1% ниже по сравнению с прерывистыми вариантами посадки, с заметными различиями в высоте и диаметре ствола. Fajardo et al. (2023) [] при изучении динамики низкорослых древесных видов рекомендуют создание полосовых рубок или окон и скарификацию верхнего слоя почвы для содействия возобновлению и реорганизации леса после нарушений.

Управление густотой древостоя оказывает существенное влияние на биоразнообразие подлеска. Лукина и соавт. [15] изучали воздействие различной интенсивности и продолжительности лесного управления на разнообразие и устойчивость растительных сообществ. Результаты показали значительное снижение индексов разнообразия на 53,37%-62,77%, доминирования на 46,04%-59,17%, выравненности на 32,58%-53,55% и богатства на 50,18%-51,30% после 20 лет управления.

Полезащитные лесополосы имеют специфические особенности, отличающие их от естественных лесов, что определяет характер процессов возобновления в них. Защитные лесные насаждения характеризуются линейной структурой, меньшей шириной и повышенным краевым эффектом, что создает особые условия для возобновления. Эти насаждения испытывают более интенсивное воздействие абиотических факторов по сравнению с лесными массивами [16-18].

Исследование Ostarin и соавт. [19] подчеркивает, что большинство насаждений не имеет достаточного подлеска и второго яруса, из которых могут формироваться новые древостои. Это особенно актуально для защитных лесных насаждений, где часто доминируют пионерные виды с ограниченной способностью к естественному возобновлению в условиях собственного полога.

На процессы естественного возобновления в полезащитных лесополосах существенное влияние оказывает окружающий агроландшафт. Sundriyal et al. (2023) [20] при изучении возобновления в гималайских сосново-дубовых лесах Индии установили, что ландшафтное лесное покрытие не оказывало значительного влияния на возобновление, в то время как факторы микросреды имели большее значение. Этот вывод имеет важное значение для защитных лесных насаждений, поскольку указывает на возможность успешного возобновления даже в условиях изолированных лесополос при обеспечении соответствующих микросайтных условий.

Таким образом, проведенный анализ научной литературы демонстрирует сложный характер взаимодействия между густотой древостоя, световым режимом и процессами естественного возобновления в лесных экосистемах, включая полезащитные лесополосы. Установлено, что оба фактора оказывают существенное влияние на все стадии возобновления - от семеношения и прорастания семян до роста и развития подроста.

Для повышения эффективности управления процессами естественного возобновления в полезащитных лесополосах целесообразно разрабатывать дифференцированные подходы к регулированию густоты с учетом видовой специфики и целевого назначения насаждений, внедрять современные технологии мониторинга для оценки параметров древостоев и светового режима, а также учитывать ландшафтный контекст при планировании мероприятий по содействию естественному возобновлению.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются изучение физиологических механизмов влияния различных спектральных составов света на рост и развитие подроста в условиях лесополос, разработка моделей оптимизации густоты древостоев с учетом их защитных функций и устойчивости, исследование взаимодействия густоты и светового режима с другими факторами в условиях агроландшафтов. Реализация этих направлений позволит повысить экологическую устойчивость и долговечность полезащитных лесных насаждений.

Цель работы - Изучить влияние густоты древостоя и уровня освещенности на процессы естественного возобновления в полезащитных лесополосах Луганской Народной Республики для разработки научно-обоснованных рекомендаций по их сохранению и восстановлению.

Материалы и методы

Объектом исследований являются полезащитные лесополосы ажурно-продуваемой конструкции в хозяйстве ГУП ЛНР «Агрофонд», которое располагается в Артемовском районе города Луганска. Исследования проводились на протяжении 2023-2025 годов. Поля расположены за поселком Дзержинского, также в 3 км от поселка Юбилейный. Лесополосы состоят из пяти рядов, ширина одной вместе с закрайками (1,5 метр) – 16 м, расстояние между рядами в среднем 2,5 м, а в ряду 1,5 м между деревьями. Главная порода – ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.). Средняя высота (Н) в полезащитных лесополосах составляет 8-15Н. Полоса имеет ажурно-продуваемую конструкцию. Видовой состав первой лесополосы представлен следующими древесными породами: *Fraxinus excelsior* L., *Prunus mahaleb* L., *Acer tataricum* L., *Ulmus laevis* Pall. Кустарниковый ярус представлен *Lonicera tatarica* L., *Caragana arborescens* Lam., *Prunus spinosa* L. Площадь лесополосы составляет 298 м^2.

Вторая лесополоса представлена следующим видовым составом: *Fraxinus excelsior* L., *Prunus mahaleb* L., *Acer tataricum* L., *Ulmus laevis* Pall., *Pyrus communis* L. Кустарниковый ярус представлен *Lonicera tatarica* L., *Caragana arborescens* Lam., *Rosa eanina* L. *Prunus spinosa* L. Площадь лесополосы составляет 406 м^2.

Третья лесополоса представлена следующим видовым составом: *Fraxinus excelsior* L., *Acer tataricum* L., *Rosa eanina* L., *Quercus robur* L., *Prunus mahaleb* L. Кустарниковый ярус представлен *Lonicera tatarica* L., *Caragana arborescens* Lam., *Prunus spinosa* L. Площадь лесополосы составляет 1234 м^2.

При исследовании использовалась методика, применяемая в лесной таксации и методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов [21]. Определение влажности почвы проводили термостато-весовым методом. Грунт в бюксы брали почвенным буром в одной точке в трёх повторностях в слое почвы 0-100 см. Почву высушивали в термостате при температуре 105˚С. К измерениям влажности почвы приступили в третей декаде марта месяца, после полного схода снега. Полевую влажность почвы рассчитывали в весовых процентах на сухую почву. Для определения запаса продуктивной влаги в почве данные влажности в весовых процентах (W) умножают на объёмный вес слоя почвы (D, г/см^3) и толщину слоя в сантиметрах

(Н) и делят на 10 (для перевода м³ воды в мм). Образцы почвы на влажность брали в зоне (наветренная и подветренная сторона лесополосы) и за зоной влияния (контроль) полезащитной лесополосы.

Сбор опада проводился с пяти опадоуловителей, они размещались в лесополосе в случайном порядке. Для сбора лесной подстилки применялась рамка (0,25×0,25). Толщина лесной подстилки измерялась мерной линейкой. Сбор образцов проводили во второй декаде октября и второй раз во второй половины марта после полного схода снега.

Под пологом материнского древостоя закладывались учётные площадки, где проводился учёт подроста и самосева. Количественный и качественный состав подроста в полезащитных лесополосах изучали методом круговых учётных площадок площадью 10 м^2 каждая (радиус 1,78 м) [4, 7]. В первой полезащитной лесополосе было заложено 10 круговых учётных площадок, во второй – 10 шт., а в третьей – 18 шт. Круговые учётные площадки размещались по ходовым линиям, на одинаковом расстоянии друг от друга, параллельно стене материнского древостоя. Для измерения высоты самосева и подроста использовали линейку с делениями через каждые 5 см до 150 см. Подрост разделяли по высоте на категории крупности: мелкий – до 0,5 м; средний – 0,51–1,5 м; крупный – более 1,5 м. Подрост по жизненному состоянию разделяли на благонадёжный, сомнительный и неблагонадёжный. Под благонадёжным подростом понимали пропорционально развитые по высоте и диаметру стволики, а под сомнительным - не пропорционально развитые по высоте и диаметру стволики или замедленнный их рост. Встречаемость подроста определяют как долю (процент) учётных площадок, на которых имеется хотя бы один жизнеспособный экземпляр подроста.

Освещённость измеряли люксметром Ю-116 в период с апреля по август (время замера 9.00, 12.00 и 16.00). Измерения производили на уровне почвы каждой круговой учётной площадки.

Обработку экспериментальных данных проводили с помощью компьютерной программы Statistica: среднее значение, стандартную ошибку среднего, критерий Стьюдента.

Результаты работы

Состав подроста древесно-кустарниковой растительности на круговых учётных площадках в изучаемых полезащитных лесополосах практически одинаков и представлен следующими видами: *Fraxinus excelsior* L., *Prunus mahaleb* L., *Pyrus communis* L., *Ulmus parvifolia* Jacq., *Lonicera tatarica* L., *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Acer tataricum* L., *Ligustrum vulgare* L. В первой полезащитной лесополосе формула подроста 84%Вм7%Ясоб5%Гроб4%Жт4%ВЗМ2%Дч2%АКБ 1%БИО (8ВмЯсобГроб+ЖтВЗМДчАКБедБИО, во второй лесополосе – 64,7%Вм21,2%Клт9,8%ВЗМ 7,8%Ясоб3,9%Дч (6Вм2КлтВЗМЯсоб+Дч), в третьей лесополосе – 48,4%Клт23,1%Ясоб 18,9%Вм7,4%АКБ2,1%Дч(5Клт2Ясоб2ВмАКБ+Дч) (табл. 1).

Наибольшее суммарное количество подроста среди всех изучаемых лесополос отмечено в полезащитной лесополосе № 3 – 97 шт., а на учётных площадках − 17 шт. (4 учётная площадка) при освещённости 8000 лк. Тогда как благонадёжный подрост дуба черешчатого отмечен при средней освещённости 6250 лк (5 учётная площадка).

Наименьшее суммарное количество подроста выявлено во второй полезащитной лесополосе – 51 шт., а наименьшее – 3 шт. (с 2 по 5 учётную площадку) при средней освещённости 3650 лк. Подрост *Quercus robur* L. во второй полезащитной лесополосе отмечен при средней освещённости 5850 лк (7 и 10 учётные площадки).

В третьей полезащитной лесополосе также был выявлен подрост *Quercus robur* L. при средней освещённости 3500 лк (8 и 10 пробные площадки), однако он по жизненному состоянию относится к сомнительному. При увеличении освещённости до 42000 лк и 50000 лк отмечен только подрост *Fraxinus excelsior* L., *Prunus mahaleb* L., *Robinia pseudoacacia* L. Доля подроста *Robinia pseudoacacia* L. на этих площадках увеличилась с 33,3% до 42,8% и 100%. Это объясняется тем, что для быстрого роста *Fraxinus excelsior* L. и *Robinia pseudoacacia* L.

требуюславский т обильного освещения в течение дня.

По количественному составу на первой и второй полезащитных лесополосах преобладает подрост *Prunus mahaleb* L., а именно, первая полезащитная лесополоса – 72 шт. и вторая – 33 шт. Тогда как на третьей полезащитной лесополосе преобладает подрост *Acer tataricum* L.

Таблица 1

Качественный состав подроста основных лесообразующих пород в полезащитных лесополосах ГУП ЛНР «Агрофонд»

Table 1

Qualitative composition of the undergrowth of the main forest-forming species in field-protecting forest belts LPR State Unitary Enterprise Agrofond

№ п/п учётной площадки	Название древесной породы, среднее количество особей, (шт.)										
	Lonicera tatarica L.	*Fraxinus excelsior* L.	*Pyrus communis* L.	*Prunus mahaleb* L.	*Ligustrum vulgare* L.	*Quercus robur* L.	*Robinia pseudoacacia* L.	*Ulmus parvifolia* Jacq.	*Acer tataricum* L.	Среднее количество особей, (шт.)	Освещённость, (лк)
Полезащитная лесополоса № 1/Shelterbelt No. 1.											
1-10	4	7	5	72	1	2	2	4	–	97±1,85	3760/6250*
Полезащитная лесополоса № 2/Shelterbelt No. 2.											
1-10	–	4	–	33	–	2	–	5	7	51±0,87	4175/5850
Полезащитная лесополоса № 3/ Shelterbelt No. 3.											
1-18	–	22	–	18	–	2	7	–	46	95±1,30	11577,8/3500

Примечание. *3760/6250 - первая цифра − освещенность на пробном участке, а вторая - освещённость на уровне почвы у дуба черешчатого (самосев)

Note. *3760/6250 the first figure is the illumination on the test site, and the second is the illumination at the soil level of the oak tree (self−seeding)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

При увеличении численности *Prunus mahaleb* L. в полезащитной лесополосе уменьшается доля *Fraxinus excelsior* L. до 7 шт. соответственно и отмечается отсутствие подроста *Acer tataricum* L. (табл. 1). Тогда как при уменьшении численности *Prunus mahaleb* L. наблюдается увеличение численности *Fraxinus excelsior* L. до 22 шт. и *Acer tataricum* L. до 46 шт. соответственно. Это объясняется тем, что *Prunus mahaleb* L. является древесной породой, которая устойчива к неблагоприятным условиям произрастания, засухоустойчивой и способной образовывать заросли, ограничивая рост других деревьев.

Встречаемость подроста *Fraxinus excelsior* L. в первой полезащитной лесополосе составляет 50 %, во второй – 20 %, а в третьей – 38,8 %. По численности подроста *Fraxinus excelsior* L. больше в третьей полезащитной лесополосе – 22 шт. (суммарная освещённость составляет от 5100 до 50000 лк), а наименьшее количество во второй полезащитной лесополосе – 4 шт. (средняя освещённость – 4250 лк). Наибольшее количество самосева до 8 шт. отмечено на первой учётной пробной площадке в третьей полезащитной лесополосе, где освещённость составляет 7500 лк.

Встречаемость самосева *Acer tataricum* L. во второй полезащитной лесополосе составляет 30 %, а в третьей полезащитной лесополосе – 67 %. Это объясняется тем, что средняя освещённость на пробных учётных площадках, где обнаружен

самосев *Acer tataricum* L. во второй полезащитной лесополосе составляет 4175 лк, а в третьей – 11577,8 лк.

Подроста *Quercus robur* L. отмечено незначительное количество до 2 шт. в каждой полезащитной лесополосе, встречаемость его составляет 20 % от общего количества. Благонадёжный подрост встречается при суммарном освещении от 6250 до 5850 лк, а сомнительный – при освещении 3500 лк. Подрост размещался в основном в просветах полезащитной лесополосы под пологом древостоя, но не под сплошным пологом и не на полностью открытых местах. Под сплошным пологом самосев *Quercus robur* L. был сомнительный и имел плохой рост и отмершую надземную часть, что обусловлено недостатком света. Благонадёжный подрост по жизненному состоянию отмечался на местах с возвышенными участками с боковым освещением. Нами выявлено, что самосев преимущественно встречался в периферийной части опушки вследствие упрощения структуры древостоя и уменьшения густоты насаждения. Центральный ряд лесополосы занимает в основном *Fraxinus excelsior* L., который усыхает, что приводит к частичному изреживанию древостоя и притоку света в лесополосу. При этом разрастание травянистой растительности практически не отмечено, так как её разрастание задерживает *Prunus mahaleb* L. и *Lonicera tatarica* L. В данном случае для улучшения роста и развития самосева дуба черешчатого рекомендуем вырубку густого подлеска.

Таблица 2

Статистическая обработка данных зависимости количества подроста от освещённости (уровень значимости α = 0,05)

Table 2

Statistical processing of data on the relationship between the number of shoots and illumination (significance level α = 0.05)

Перемен-ные	Среднее значение	Стандартное отклонение	Количество значений	Ошибка стандартного отклонения	t-критерий Стьюдента	Число степеней свободы, (k)	p-зачение
Variables	Mean	Standard Deviation	Number of Observations	Standard Error of the Mean	Student's t-test	Degrees of Freedom (k)	p-value
1	2	3	4	5	6	7	8
Первая полезащитная лесополоса/The First Shelterbelt							
1.	10	5,85	10	1,85	5,246	9	0,00053
2.	3760	1764,59	10	558,01	6,738	9	0,00008
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8
Вторая полезащитная лесополоса/The Second Shelterbelt/The Second Shelterbelt							
1.	5	2,60	10	0,82	6,199	9	0,00016
2.	4175	2745,42	10	868,18	4,809	9	0,00096
Третья полезащитная лесополоса/ The Third Shelterbelt							
1.	5	5,37	18	1,26	4,172	17	0,00064
2.	11577,8	16590,20	18	3910,35	2,961	17	0,00875

Примечание: 1 - количество особей, (шт.); 2 - освещённость, лк

Note: 1 - number of individuals, (pcs.); 2 - illumination, lx

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

При статистической обработке данных по критерию Стьюдента (зависимости количества особей от освещенности) было выявлено, что p-значение во всех вариантах меньше уровня значимости (α = 0,05).

Следовательно, различия обнаружены на высоком уровне статистической значимости (табл. 2). Нами осуществлён анализ подроста по категориям крупности во всех изучаемых полезащитных лесополосах (табл. 3).

Таблица 3

Распределение подроста по категориям крупности в полезащитных лесополосах ГУП ЛНР «Агрофонд»

Table 3

Distribution of undergrowth by size category in field-protecting forest belts of the LPR State Unitary Enterprise «Agrofond»

Название древесно-кустарниковой породы	Высота по категориям крупности, шт. на пробной площади			
	мелкий (до 0,5 м)	средний (0,51-1,5 м)	крупный (более 1,5 м)	Всего
1	2	3	4	5
Полезащитная лесополоса №1				
Первая круговая учетная площадка/ First Circular Sampling Plot				
Lonicera tatarica L.	1	–	–	1
Вторая круговая учетная площадка / Second Circular Sampling Plot				
Fraxinus excelsior L.	–	1	–	1
Pyrus communis L.	1	–	–	1
Prunus mahaleb L.	2	1	–	3
Третья круговая учетная площадка/ Third Circular Sampling Plot				
Fraxinus excelsior L.	1	–	–	1
Prunus mahaleb L.	7	–	–	7
Четвертая круговая учетная площадка/ Fourth Circular Sampling Plot				
Fraxinus excelsior L.	1	1	–	2
Ligustrum vulgare L.	1	–	–	1
Prunus mahaleb L.	11	2	–	13
Quercus robur L.	1	–	–	1
Пятая круговая учетная площадка/ Fifth Circular Sampling Plot				
Prunus mahaleb L.	14	–	–	14
Quercus robur L.	1	–	–	1
Шестая круговая учетная площадка/ Sixth Circular Sampling Plot				
Robinia pseudoacacia L.	–	1	–	1
Fraxinus excelsior L.	2	–	–	2
Prunus mahaleb L.	9	1	–	10
Седьмая круговая учетная площадка/ Seventh Circular Sampling Plot				
Prunus mahaleb L.	10	–	–	10
Pyrus communis L.	4	–	–	4
Fraxinus excelsior L.	1	–	–	1
Lonicera tatarica L.	–	1	–	1
Восьмая круговая учетная площадка/ Eighth Circular Sampling Plot				
Ulmus parvifolia Jacq.	2	–	–	2
Lonicera tatarica L.	1	–	–	1
Девятая круговая учетная площадка/ Ninth Circular Sampling Plot				
Ulmus parvifolia Jacq.	1	–	–	1
Prunus mahaleb L.	7	2	–	9
Lonicera tatarica L.	–	1	–	1
Десятая круговая учетная площадка/ Tenth Circular Sampling Plot				
Prunus mahaleb L.	5	–	–	5
Robinia pseudoacacia L.	–	1	–*	1
Всего/ Total:	**83**	**12**	**–**	**95**

Примечание:* подроста данной категории крупности не выявлено

Note:* no growth of this size category was detected

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Во всех лесополосах отмечено преобладание мелкого подроста по сравнению со средним и крупным. Во второй полезащитной лесополосе доля мелкого подроста составляет 87,5 % от общего количества, доля среднего подроста – 12,5 %, а крупный подрост отсутствует. Причинами не перехода мелкого подроста в крупный в условиях Луганской Народной Республики можно объяснить двумя причинами, а именно, недостатком влаги в почве в летне-осенний период и сильным разрастанием подлеска в лесополосах.

Для Луганской Народной Республики конструкция полезащитных лесополос должна быть продуваемая или ажурно-продуваемая, где доля кустарника не превышает 25 %. Ранее при изучении подроста в лесопарковой части парка-памятника садово-паркового искусства «Острая Могила» был отмечен подрост всех категорий крупности. Это свидетельствует о том, что в лесопарках сохраняются лучшие условия для его роста и развития за счёт накопления большего количества влаги [3]. *Quercus robur* L. – светолюбивая порода, которая не может развиваться в затенении вследствие чего погибает или образует «торчки». Нами была выявлена зависимость наличия и состояния самосева *Quercus robur* L. от густоты материнского древостоя (табл. 4).

Таблица 4

Густота материнского древостоя и состояние самосева дуба черешчатого

Table 4

Density of the mother stand and condition of the self-sowing of the sweet cherry oak

№ п/п полезащитной лесополосы	Номер пробной повторности	Количество деревьев на 1 га, шт./га	Густота древостоя	Жизнеспособность самосева
Shelterbelt No.	Sample Plot Replicate No.	Number of Trees per 1 ha, units/ha	Stand Density	Seedling Viability
1	Первая/ First"	327	Средней густоты/ Medium density	Благонадёжный/ Reliable
	Вторая/ Second"	298	Средней густоты /Medium density	Благонадёжный/ Reliable
2	Первая/ First"	690	Густой /Dense	–
	Вторая/ Second"	426	Густой /Dense	Благонадёжный/ Reliable
3	Первая/ First"	286	Средней густоты/ Medium density	–
	Вторая/Second"	280	Средней густоты /Medium density	–
	Третья/ Third	783	Густой /Dense	Сомнительный/Doubtful
	Четвёртая/ Fourth	208	Средней густоты/ Medium density	–*
			Средней густоты /Medium density	

Примечание. *самосева не выявлено
Note. no self-seeding was detected
Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

В результате исследований установлено, что при густоте древостоя от 208 до 286 шт./га (средняя густота) самосева *Quercus robur* L. не наблюдается. При увеличении количества деревьев в древостое от 298-327 шт./га (средняя густота) до 426 шт./га (густой древостой) по жизненному состоянию самосев *Quercus robur* L. благонадёжный. При густом древостое (783 шт./га) самосев преимущественно сомнительный. Древостой в указанных полезащитных лесополосах старовозрастный, который характеризуется разреженной структурой, а значит оптимальными условиями для развития самосева данной породы. Тогда как загущенность древесного яруса в третьей полезащитной лесополосе (третья повторность) не способствует его росту, поэтому необходимо проведение лесоводческих мероприятий, а именно, прореживание сопутствующих пород и частичная вырубка подлеска. Густота древостоя 208, 280 и 286 шт./га не способствует появлению всходов, так как сильно изреженный древостой пропускает много солнечного света, который иссушает почву и не даёт возможности прорастать семенам.

Освещённость и густота древостоя взаимосвязаны между собой и влияют на жизненное состояние самосева всех древесно-кустарниковых пород, произрастающих на учётных площадках, в то время как влажность почвы и масса листового опада больше влияют на прорастание их семян. Благонадёжный подрост *Quercus robur* L. был выявлен преимущественно на периферийной части опушки, где есть боковое освещение. В средней части лесополосы, при густом древостое, самосев всех обнаруженных пород неблагонадёжный, так как недостаточный уровень освещенности, рыхлый листовой опад слабо разлагается, накапливается твёрдый листовой опад. На открытых опушках подрост всех древесно-кустарниковых пород сомнительный и его меньшее количество, так как освещённость составляет уже 42-50000 лк и влага в верхних слоях почвы не сохраняется. При густом древостое наблюдаются следующие процессы: уменьшение освещённости под материнским древостоем, увеличение твёрдого листового опада, накопление влаги. В древостое среднем по густоте и в зонах между материнским древостоем и опушкой сохраняется влага и уровень освещённости достаточный для протекания процессов разложения рыхлого листового опада, что благоприятно влияет на появление всходов древесно-кустарниковых пород. Кроме того, за опушкой скорость ветра падает, и процессы испарения влаги с поверхности почвы замедляются.

В степной зоне, как правило, лето жаркое, сухое с небольшим количеством осадков, а максимальное количество осадков выпадает в весенний и осенний период. Летом выпадают осадки ливневого характера, что усиливает поверхностный сток. В связи, с чем влага является лимитирующим фактором для возобновления растительности и тем самым, оказывает влияния на биомассу лесного фитоценоза. При увеличении периода засух, что наблюдается в последнее время, деревьям тяжелее конкурировать с кустарниковой и травянистой растительностью за влагу, что обусловлено особенностями размещения корневой системы в почве. В результате проведенных исследований выявлено, заметное отличие во влажности почвы в контроле и в зоне влияния полезащитной полосы (табл. 5).

Наилучшие показатели влажности почвы были отмечены на подветренной стороне лесополосы, чем на наветренной стороне и у контроля. Так на наветренной стороне у первой лесополосы среднее значение продуктивной влаги составило 32,20±8,02 мм, а на подветренной – 41,06±6,77 мм. Тогда как в контроле – -90,54±5,02 мм. Запас продуктивной влаги во второй лесополосе на наветренной стороне составил 2,41±6,18 мм, на подветренной стороне – 68,08±9,95 мм, контроль – 77,63±8,27 мм. Запас продуктивной влаги на наветренной стороне третьей полезащитной лесополосы составил 11,28±9,73 мм, на подветренной – 79,53±5,90 мм, контроль – -5,5±9,30 мм. Во всех трёх полезащитных лесополосах происходит накопление влаги по сравнению с контролем, которая задерживается корнями древесно-кустарниковой растительности. С наветренной стороны полезащитные лесополосы задерживают ветра юго-восточного направления,

которые весной сопровождаются суховеями, поэтому и показатели полевой влажности и запаса продуктивной влаги меньше, чем с подветренной. Полевая влажность во второй полезащитной лесополосе практически одинакова с контролем, что можно объяснить большей долей кустарниковых пород в лесополосе, а как следствие, низким показателем возобновления древесных пород в ней. В целом при мощности слоя почвы 0-100 см запас продуктивной влаги меньше 60 мм свидетельствует о недостаточной обеспеченности территории влагой.

Таблица 5

Запас продуктивной влаги в почве в зоне и за зоной влияния полезащитной лесополосы

Table 5

The reserve of productive moisture in the soil in the zone and beyond the zone of influence of the field-protecting forest belt

Показатель / Parameter	**Контроль / Control**	**Наветренная сторона / Windward Side**	**Подветренная сторона / Leeward Side**
Лесополоса 1 / Shelterbelt 1			
Полевая влажность, % / Field Moisture, % (0-100 см)	7,14 ± 1,64	16,52 ± 2,51	17,56 ± 1,81
Запас продуктивной влаги, мм / Plant-Available Water Storage, mm (0-100 см)	-90,54 ± 5,02	32,20 ± 8,02	41,06 ± 6,77
Лесополоса 2 / Shelterbelt 2			
Полевая влажность, % / Field Moisture, % (0-100 см)	19,81 ± 2,62	17,41 ± 3,66	19,40 ± 2,76
Запас продуктивной влаги, мм / Plant-Available Water Storage, mm (0-100 см)	77,63 ± 8,27	2,41 ± 6,18	68,08 ± 9,95
Лесополоса 3 / Shelterbelt 3			
Полевая влажность, % / Field Moisture, % (0-100 см)	12,70 ± 3,14	14,34 ± 3,00	20,50 ± 1,77
Запас продуктивной влаги, мм / Plant-Available Water Storage, mm (0-100 см)	-15,50 ± 9,30	11,28 ± 9,73	79,53 ± 5,90

Примечание: Данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение по трём пробам / Note: Data are presented as mean value ± standard deviation for three samples.

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

При статистической обработки данных по критерию Стьюдента (зависимости количества особей от полевой влажности и запаса продуктивной влаги) было выявлено, что p-значение зависимости количества особей от полевой влажности меньше уровня значимости ($\alpha = 0,05$) (табл. 6).

Следовательно, различия обнаружены на высоком уровне статистической значимости (табл. 6). Тогда как при статистической обработки зависимости количества особей от запаса продуктивной влаги p-значение больше уровня значимости, а значит, данные не достоверны. Это связано с тем, что у самосева ещё слабая корневая система, которая располагается в верхних слоях почвы, поэтому полевая влажность это показатель, который более значим для них.

Как известно, фактором, отрицательно влияющим на появление всходов *Quercus robur* L. в низкополнотных насаждениях является уменьшение влажности лесной подстилки [24]. Г.Г. Юнаш считает, что при упрощении структуры насаждения условия для появления всходов ухудшаются, а для их роста и развития улучшаются. Лучшие условия для роста и развития всходов *Quercus robur* L. проявляются в третьей полезащитной лесополосе, где масса листового опада в осенний период наибольшая и составляет 239,0 г.

Наименьшая масса листового опада до сушки была выявлена во второй и первой полезащитной лесополосе – 102,67 г и 110,98 г соответственно (табл. 7).

Таблица 6

Статистическая обработка данных зависимости количества подроста от полевой влажности и запаса продуктивной влаги (уровень значимости α = 0,05)

Table 6

Statistical processing of data on the dependence of the number of seedlings on field moisture and productive moisture reserves (significance level α = 0.05)

Переменные / Variables	Среднее значение / Mean Value	Стандартное отклонение / Standard Deviation	Количество значений / Number of Values	Ошибка стандартного отклонения / Standard Error of	t-критерий Стьюдента / Student's t-test	Число степеней свободы (k) / Degrees of Freedom (k)	p-значение / p-value
*1	16,52	3,87	3	2,24	7,39	2	0,018
2	17,56	1,62	3	0,93	18,83	2	0,003
3	41,07	22,11	3	12,76	3,22	2	0,085
4	32,20	42,25	3	24,40	1,32	2	0

Примечание: *1 - зависимость количества особей (шт.) от полевой влажности (наветренная сторона); 2 - зависимость количества особей (шт.) от полевой влажности (подветренная сторона); 3 - зависимость количества особей (шт.) от запаса продуктивной влаги (подветренная сторона); 4 - зависимость количества особей (шт.) от запаса продуктивной влаги (наветренная сторона)

Note: dependence of the number of individuals (pcs.) on field humidity (windward side); 2 - dependence of the number of individuals (pcs.) on field humidity (leeward side); 3 - dependence of the number of individuals (pcs.) on productive moisture reserve (leeward side); 4 - dependence of the number of individuals (pcs.) on productive moisture reserve (windward side)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 7

Листовой опад в полезащитных лесополосах в осенний и весенний периоды

Table 7

Leaf litter in field-protecting forest belts in autumn and spring

№ п/п полезащитной лесополосы / No. of Shelterbelt	Период отбора проб (осень), г / Sampling Period (Autumn), g			Период отбора проб (весна), г / Sampling Period (Spring), g		
	вес до сушки, г / Weight Before Drying, g	вес после сушки, г / Weight After Drying, g	масса испарившейся влаги, г / Mass of Evaporated Moisture, g	вес до сушки, г / Weight Before Drying, g	вес после сушки, г / Weight After Drying, g	масса испарившейся влаги, г / Mass of Evaporated Moisture, g
1.	110,98	89,67	21,31	78,00	68,16	9,84
2.	102,67	85,00	17,67	73,20	50,44	22,76
3.	239,00	178,42	60,58	82,10	70,11	11,99

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

За осень и зиму происходит разложение и гумунификация листового опада за счёт микроорганизмов и других организмов. Микроорганизмы сначала расщепляют сложные органические соединения, такие как целлюлоза и лигнин, на более простые молекулы. Разложение листового опада играет важную роль в биологическом круговороте веществ и в поддержании плодородия почвы. Максимальная масса листового опада до сушки и после сушки в весенний период наблюдается в третьей полезащитной лесополосе – 82,10 г.

В осенний период отбора проб масса листового опада больше, чем в весенний период. Таким образом, можно сделать вывод, чем больше влаги скапливается в листве, тем больше они имеют вес и на меньшее расстояние разносятся ветром, а значит, лист плотнее ляжет на почву. В то же время уплотнение крупного листа как у *Quercus robur* L. будет способствовать ухудшению прорастания желудя.

На протяжении трёх лет исследований (2019-2021 гг.) масса листового опада каждый год снижается.

Таблица 8

Масса листового опада за три года

Table 8

Leaf litter mass over three years

№ п/п полезащитной лесополосы/ No. of Shelterbelt	Период отбора проб, г/ Sampling Period, g		
	2019	2020	2021
1.	132,50	110,98	110,20
2.	110,67	102,67	100,35
3.	243,54	239,00	236,00

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Это связано с тем, что большая часть древостоя со временем выпало и состояние Fraxinus excelsior L. можно считать удовлетворительным или неудовлетворительным (табл. 8).

Согласно М.Н. Фисуну и М.М. Чемазокову скорость впитывания выпадающих осадков и глубина промачивания почвы на участках, где опад листьев ежегодно убирают, на 15-35 % ниже, чем при оставлении опада на месте. В условиях степной зоны нами выявлена следующая закономерность, чем больше листового опада накапливается, тем больше влаги останется в почве осенью, и тем быстрее будут идти процессы разложения листвы. Кроме того, в условиях Луганской Народной Республики зачастую август и сентябрь, жаркие и воды в листьях мало, что не способствует их разложению. Если сравнивать вес листового опада осенью и весной, то в третьей полезащитной лесополосе процесс разложения протекал быстрее, чем в первой и второй лесополосе, так как было больше листьев и влаги под ними.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что подрост преимущественно мелкий по крупности и представлен: *Fraxinus excelsior* L., *Prunus mahaleb* L., *Pyrus communis* L., *Ulmus parvifolia* Jacq., *Lonicera tatarica* L., *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Acer tataricum* L., *Ligustrum vulgare* L. В первой полезащитной лесополосе формула подроста 8ВмЯсобГроб+ЖтВЗМДчАКБедБИО, во второй лесополосе – 6Вм2КлтВЗМЯсоб+Дч, в третьей лесополосе – 5Клт2Ясоб2ВмАКБ+Дч. Наибольшее суммарное количество подроста среди всех изучаемых лесополос отмечено в третьей полезащитной лесополосе – 97 шт. с преобладанием подроста *Prunus mahaleb* L. − 72 шт. при средней освещённости 3760 лк. При увеличении средней освещённости (11577,8 лк) выявлено увеличение подроста *Acer tataricum* L. до 46 шт. и уменьшение подроста *Prunus mahaleb* L. до 18 шт.

Подроста *Quercus robur* L. отмечено незначительное количество до 2 шт. в каждой полезащитной лесополосе, встречаемость его составляет 20 % от общего количества. Благонадёжный подрост встречается при суммарном освещении от 6250 до 5850 лк, а сомнительный – при освещении 3500 лк.

Во всех лесополосах отмечено преобладание мелкого подроста по сравнению со средним и крупным. Во второй полезащитной лесополосе доля мелкого подроста составляет 87,5 % от общего количества, доля среднего подроста – 12,5 %, а крупный подрост отсутствует. Причинами не перехода мелкого подроста в крупный в условиях Луганской Народной Республики можно объяснить двумя причинами, а именно, недостатком влаги в почве в летне-осенний период и сильным разрастанием подлеска в лесополосах.

Освещённость и густота древостоя взаимосвязаны между собой и влияют на жизненное состояние самосева всех древесно-кустарниковых пород, произрастающих на учётных площадках, в то время как влажность почвы и масса листового опада больше влияют на прорастание их семян.

Лучшие условия для роста и развития всходов Quercus robur L. проявляются в третьей

полезащитной лесополосе, где масса листового опада в осенний период наибольшая и составляет 239,0 г. Наименьшая масса листового опада до сушки выявлена во второй и первой полезащитной лесополосе 102,67 г и 110,98 г соответственно.

Во всех трёх полезащитных лесополосах происходит накопление влаги по сравнению с контролем (открытое пространство), которая задерживается корнями древесно-кустарниковой растительности. Однако, влаги в весенний период в почве полезащитных лесополос недостаточно для успешного возобновления самосева.

При густоте древостоя от 208 до 286 шт./га (средняя густота) самосева *Quercus robur* L. не наблюдается. При густом древостое (783 шт./га) самосев преимущественно сомнительный. При увеличении количества деревьев в древостое от 298-327 шт./га (средняя густота) до 426 шт./га (густой древостой) по жизненному состоянию самосев *Quercus robur* L. благонадёжный. Густота древостоя 208, 280 и 286 шт./га не способствует появлению всходов, так как сильно изреженный древостой пропускает много солнечного света, который иссушает почву и не даёт возможности прорастать семенам.

Список литературы

1. Huang C., Fu S., Tong Y., Ma X., Yuan F., Ma Y., Feng C., Liu H. Impacts of Forest Management on the Biodiversity and Sustainability of Carya dabieshanensis Forests. Forests. 2023; 14 (7): 1331. – DOI: https://doi.org/10.3390/f14071331.
2. Kholdaenko Y.A., Belokopytova L.V., Zhirnova D.F., Upadhyay K.K., Tripathi S.K., Koshurnikova N.N., Sobachkin R.S., Babushkina E.A., Vaganov E.A. Stand density effects on tree growth and climatic response in Picea obovata Ledeb. plantations. Forest Ecology and Management. 2022; 519: 120349. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120349.
3. Tymińska-Czabańska L., Hawryło P., Janiec P., Socha J. Tree height, growth rate and stand density determined by ALS drive probability of Scots pine mortality. Ecological Indicators. 2022; 145: 109643. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109643.
4. Liu L., Schuster G.L., Moosmüller H., Stamnes S., Cairns B., Chowdhary J. Optical properties of morphologically complex black carbon aerosols: Effects of coatings. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022; 281: 108080. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108080.
5. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В. Динамика сумм площадей сечений и запасов в культурах сосны разной начальной густоты. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 243: 120-135. – DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.120-135.
6. Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Таксационные показатели сосновых древостоев по данным долговременных наблюдений. Сибирский лесной журнал. 2023; 2: 3-16. – DOI: https://doi.org/10.15372/SJFS20230201.
7. Лебедев А.В. Динамическая модель роста и производительности сосновых древостоев (Pinus sylvestris L.) Унженской низменности. Лесотехнический журнал. 2024; 14 (3): 127-151. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8.
8. Грабарник П.Я., Шанин В.Н., Чертов О.Г. [и др.]. Моделирование динамики лесных экосистем как инструмент прогнозирования и управления лесами. Лесоведение. 2019; 6: 488-500. – DOI: https://doi.org/10.1134/S0024114819030033.
9. Cheng F., Ajo-Franklin J.B., Rodriguez Tribaldos V. High-resolution near-surface imaging at the basin scale using dark fiber and distributed acoustic sensing: Towards site effect estimation in urban environments. J. Geophys. Res. Solid Earth. 2023; 128 (9): e2023JB026957. – DOI: https://doi.org/10.1029/2023JB026957.
10. Способ оценки естественного возобновления леса: пат. 000224_000128_0002081557_19970620_C1 РУ / Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства. – опубл. 20.06.1997. – МПК A01G 23/00.
11. Tymińska-Czabańska L., Janiec P., Hawryło P., Ślopek J., Zielonka A., Netzel P., Janczyk D., Socha J. Modeling the effect of stand and site characteristics on the probability of mistletoe infestation in Scots pine stands using remote sensing data. Forest

Ecosystems. 2024; 11: 100191. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100191.
12. Morin R.S., Healey S.P., Prisley S., Randolph K.C., Westfall J.A., Gray A.N. Editorial: Monitoring and responding to global change to promote resilient and productive forests through innovative forest inventory. Frontiers in Forests and Global Change. 2023; 6. – DOI: https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1168453.
13. Chekanyshkin A.S. Growth and Condition of the English Oak in the Mixed Stands of Forest Shelterbelts. Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal. 2024; 3: 65-72. – DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-65-72.
14. Fajardo D., Angioni C., Casson F.J., Field A.R., Maget P., Manas P., ASDEX Upgrade Team, JET Contributors. Analytical model for the combined effects of rotation and collisionality on neoclassical impurity transport. Plasma Physics and Controlled Fusion. 2023; 65 (3): 035021. – DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6587/acb0fc.
15. Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V. [et al.]. Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects. Forest Science Issues. 2021; 4 (1): 1. – DOI: https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60.
16. Семенов М.А., Высоцкий А.А., Пащенко В.И. Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019; 5 (371): 57-69. – DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57.
17. Коломыц Э.Г. Мониторинг устойчивого развития лесных экосистем на современном этапе глобального потепления. География и природные ресурсы. 2024; 45 (3): 5-16. – DOI: https://doi.org/10.15372/GIPR20240301.
18. Усольцев В.А. Биоразнообразие и биопродуктивность лесов в контексте климатогенной биогеографии. Эко-потенциал. 2019; 1 (25): 48-115.
19. Ostarin A., Barbeito I., Elfving B., Johansson U., Nilsson U. Varying rectangular spacing yields no difference in forest growth and external wood quality in coniferous forest plantations. Forest Ecology and Management. 2021; 489: 119040. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119040.
20. Sundriyal R.C., Joshi V.C., Negi V.S. Natural Regeneration Dynamics of Himalayan Forests: Implications for Landscape Restoration. Ecological Restoration. 2025; 43 (1): 25-42. – DOI: https://doi.org/10.3368/er.43.1.25.
21. Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов / Под редакцией Е.С. Павловского и М.И. Долгилевича. М.: ВАСХНИЛ, 1985. – 112 с.

References

1. Huang C., Fu S., Ma X., He X., Zhou C., Feng L., Zhang H. The Effect of Stand Density, Biodiversity, and Spatial Structure on Stand Basal Area Increment in Natural Spruce-Fir-Broadleaf Mixed Forests. Forests. 2022; 13 (2): 162. – DOI: https://doi.org/10.3390/f13020162.
2. Kholdaenko Yu.A., Tripathi S.K., Belokopytova L.V., Sobachkin R.S., Zhirnova D.F., Upadhyay K.K., Koshurnikova N.N., Vaganov E.A., Babushkina E.A. Stand density effects on tree growth and climatic response in Picea obovata Ledeb. plantations. Forest Ecology and Management. 2022; 519: 120349. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120349.
3. Tymińska-Czabańska L., Hawryło P., Socha J. Assessment of the effect of stand density on the height growth of Scots pine using repeated ALS data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022; 112: 102763. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102763.
4. Liu D., Zhang X., He X., Zhou C., Feng L., Zhang H. The Effect of Stand Density, Biodiversity, and Spatial Structure on Stand Basal Area Increment in Natural Spruce-Fir-Broadleaf Mixed Forests. Forests. 2022; 13 (2): 162. – DOI: https://doi.org/10.3390/f13020162.
5. Dubenok N.N., Lebedev A.V. Growth and yield of pine plantations of different initial densities. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022; 1010 (1): 012134. – DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012134.

6. Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Taktsatsionnyye pokazateli sosnovykh drevostoyev po dannym dolgovremennykh nablyudeniy [Taxation indicators of pine stands according to long-term observations]. Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Forest Journal. 2023; 2: 3-16. (In Russ.). – DOI: https://doi.org/10.15372/SJFS20230201.
7. Lebedev A.V. Dinamicheskaya model' rosta i proizvoditel'nosti sosnovykh drevostoyev (Pinus sylvestris L.) Unzhenskoy nizmennosti [Dynamic model of growth and productivity of pine stands (Pinus sylvestris L.) of the Unzhenskaya lowland]. Lesotekhnicheskiy zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2024; 14 (3): 127-151. (In Russ.). – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8.
8. Grabarnik P.Ya., Shanin V.N., Chertov O.G. [i dr.] Modelirovaniye dinamiki lesnykh ekosistem kak instrument prognozirovaniya i upravleniya lesami [Modeling of forest ecosystem dynamics as a tool for forest forecasting and management]. Lesovedeniye = Forest Science. 2019; 6: 488-500. (In Russ.). – DOI: https://doi.org/10.1134/S0024114819030033.
9. Cheng H., Fu S., Ma X., Ma Y., Feng C., Tong Y., Yuan F., Liu H. Impacts of Forest Management on the Biodiversity and Sustainability of Carya dabieshanensis Forests. Forests. 2023; 14 (7): 1331. – DOI: https://doi.org/10.3390/f14071331.
10. Sposob otsenki yestestvennogo vozobnovleniya lesa: pat. 000224_000128_0002081557_19970620_C1 RU / Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaystva [Method for assessing natural forest regeneration: pat. 000224_000128_0002081557_19970620_C1 RU / All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization]. – opubl. 20.06.1997. – MPK A01G 23/00. (In Russ.).
11. Tymińska-Czabańska L., Janiec P., Hawryło P., Ślopek J., Zielonka A., Netzel P., Janczyk D., Socha J. Modeling the effect of stand and site characteristics on the probability of mistletoe infestation in Scots pine stands using remote sensing data. Forest Ecosystems. 2024; 11: 100191. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100191.
12. Morin R.S., Healey S.P., Prisley S., Randolph K.C., Westfall J.A., Gray A.N. Editorial: Monitoring and responding to global change to promote resilient and productive forests through innovative forest inventory. Frontiers in Forests and Global Change. 2023; 6: 1168453. – DOI: https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1168453.
13. Chekanyshkin A.S. Growth and Condition of the English Oak in the Mixed Stands of Forest Shelterbelts. Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal. 2024; 3: 65-72. – DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-65-72.
14. Fajardo A., Moreno-Meynard P., Soto D.P. Forest stand dynamics of a short-stature tree species: Ecological knowledge for sustainable forest management. Journal of Applied Ecology. 2023; 60 (5): 856-867. – DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2664.14662.
15. Lukina N.V., Geraskina A.P., Gornov A.V. [et al.] Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects. Forest Science Issues. 2021; 4 (1): 1-45. – DOI: https://doi.org/10.31509/2658-607x-202141k-60.
16. Semenov M.A., Vysotskiy A.A., Pashchenko V.I. Prognoz adaptivnykh prisposobleniy v lesnom khozyaystve v svyazi s vozmozhnymi klimaticheskimi izmeneniyami [Forecast of adaptive adaptations in forestry due to possible climate changes]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal = Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal. 2019; 5 (371): 57-69. (In Russ.). – DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57.
17. Kolomyts E.G. Monitoring ustoychivogo razvitiya lesnykh ekosistem na sovremennom etape global'nogo potepleniya [Monitoring of sustainable development of forest ecosystems at the present stage of global warming]. Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and Natural Resources. 2024; 45 (3): 5-16. (In Russ.). – DOI: https://doi.org/10.15372/GIPR20240301.
18. Usol'tsev V.A. Bioraznoobraziye i bioproduktivnost' lesov v kontekste klimatogennoy biogeografii [Biodiversity and bioproductivity of forests in the context of climatogenic biogeography]. Eko-potentsial = Eco-Potential. 2019; 1 (25): 48-115. (In Russ.).

19. Ostarin A., Barbeito I., Elfving B., Johansson U., Nilsson U. Varying rectangular spacing yields no difference in forest growth and external wood quality in coniferous forest plantations. Forest Ecology and Management. 2021; 489: 119040. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119040.
20. Sundriyal R.C., Joshi V.C., Negi V.S. Natural Regeneration Dynamics of Himalayan Forests: Implications for Landscape Restoration. Ecological Restoration. 2025; 43 (1): 25-42. – DOI: https://doi.org/10.3368/er.43.1.25.
21. Metodika sistemnykh issledovaniy lesoagrarnykh landshaftov / Pod redaktsiyey Ye.S. Pavlovskogo i M.I. Dolgilevicha [Methodology of system research of forest-agrarian landscapes / Edited by E.S. Pavlovsky and M.I. Dolgilevich]. M.: VASKhNIL, 1985. – 112 s. (In Russ.).

Сведения об авторах

Грибачева Олеся Владимировна – кандидат биологических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова, кв. Якира, д.3, кв.22, г. Луганск, 291050, Луганская Народная Республика, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5428-143X, e-mail: kafles78@mail.ru

Гаврилюк Юлия Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля» «Институт гражданской защиты», кв. Дзержинского, д.6, кв. 126, г. Луганск, 291042, Луганская Народная Республика, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3897-3222, e-mail: juliagavriluk2023@yandex.ru

Копец Юрий Витальевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля» «Институт гражданской защиты», ул. Коммунарская, 128, г. Луганск, Луганская Народная Республика, e-mail: Yura_87-87@mail.ru

Information about the authors

Olesya V. Gribacheva – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “K.E. Voroshilov Lugansk State Agrarian University, 3 Yakira Square, Apt. 22, Lugansk, 291050, Lugansk People’s Republic, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5428-143X, e-mail: kafles78@mail.ru

Yulia V. Gavriluk – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, «V. Dal Lugansk State University» «Institute of Civil Protection», Dzerzhinskogo Square, 6, Apt. 126, Lugansk, 291042, Lugansk People's Republic, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3897-3222, e-mail: juliagavriluk2023@yandex.ru

Yuriy V. Kopets – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «V. Dal State University» «Institute of Civil Protection», 128 Kommunarskaya Street, Lugansk, Lugansk People’s Republic, e-mail: Yura_87-87@mail.ru

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/4
УДК 630*181.52:630*587.11(571.51-25)

Оценка естественного возобновления в рекреационных сосняках западной части лесопаркового зеленого пояса г. Красноярска

Людмила С. Евдокимова[1,3], els@ipklh.ru https://orcid.org/0009-0003-3559-2050
Андрей И. Татаринцев[2], lespat@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-2969-8740
Людмила В. Зленко[3] ✉, zlenkolv@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8857-8389
Любовь А. Полонская[3], polonskaya@ipklh.ru https://orcid.org/0009-0001-0551-6992

[1]*Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ул. Академгородок, 50, Красноярск, 660036, Российская Федерация*

[2]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Российская Федерация*

[3]*Федеральное автономное учреждение дополнительного профессионального образования «Институт повышения квалификации работников лесного хозяйства», ул. Заводская, 1/1, пом. 2, Дивногорск, 663090, Российская Федерация*

Объект исследований – рекреационные сосняки в подтаежной части лесопаркового зеленого пояса г. Красноярска Красноярского края. Цель работы – оценить естественное возобновление в рекреационных сосняках. Заложено 12 безразмерных пробных площадей (ПП) по непровешенной ходовой линии, в том числе шесть ПП – в сосняках на левом берегу р. Енисей, шесть – на правом берегу. На пробных площадях трансектным методом определяли рекреационную нарушенность насаждений, учитывали подрост по методике, изложенной в актуальных Правилах лесовосстановления. При обработке и анализе данных учета подроста руководствовались приведенными в Правилах лесовосстановления положениями, взаимосвязь анализируемых показателей оценивали по непараметрическому коэффициенту Спирмена. Определены основные показатели благонадежного подроста: размерная структура (представленность мелких, средних, крупных растений), породный состав, количество в переводе на крупный, встречаемость. Выявлены отличия в лесовозобновительном процессе в подтаежных сосняках левобережной и правобережной частей, обусловленные близостью насаждений лесостепной и горно-таежной зон соответственно. Установлена значимая связь количества подроста сосны в левобережных сосняках, встречаемости (характера размещения) подроста с уровнем рекреационной нарушенности насаждений. Проанализирована успешность естественного возобновления, обозначены мероприятия для повышения лесовозобновительного потенциала рекреационных сосняков.

Ключевые слова: *подтайга, сосняки, рекреационная нарушенность, подрост, успешность лесовозобновления, способы лесовосстановления*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка естественного возобновления в рекреационных сосняках западной части лесопаркового зеленого пояса г. Красноярска / Л.С. Евдокимова, А.И. Татаринцев, Л.В. Зленко, Л.А. Полонская // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 58-76. – *Библиогр.: с. 71-75 (29 назв.).* –DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/4.

*П*оступила 18.06.2025. **Пересмотрена** 26.10. 2025. **Принята** 30.11.2025. **Опубликована онлайн** 26.12.2025.

Article

Assessment of natural regeneration in recreational pine forests in the western part of the forest park green belt in Krasnoyarsk

Liudmila S. Evdokimova [1,3], els@ipklh.ru https://orcid.org/0009-0003-3559-2050
Andrey I. Tatarintsev [2], lespat@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-2969-8740
Liudmila V. Zlenko [3] ✉, zlenkolv@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8857-8389
Lyubov A. Polonskaya [3], polonskaya@ipklh.ru https://orcid.org/0009-0001-0551-6992

[1] *Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS" V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok St., 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation*

[2] *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsk Worker Newspaper Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation*

[3] *Federal Autonomous Institution of Additional Professional Education "Institute for Advanced Training of Forestry Workers", 1/1 Zavodskaya str., room 2, Divnogorsk, 663090, Russian Federation*

Abstract

The object of this study is recreational pine forests in the subtaiga region of the Krasnoyarsk forest park greenbelt, Krasnoyarsk region. The aim of the research is to assess the natural regeneration of these forests. Twelve dimensionless test sites (PPs) were established along an unmarked transect line, with six PPs in the pine forest on the left bank of the Yenisei River and six on the right bank. In these trial areas, recreational disturbance to the plantings was measured using the transect method, and the undergrowth was counted according to the guidelines set out in the current Reforestation Rules. When processing and analysing the undergrowth data, we followed the provisions of the Reforestation Regulations, and assessed the relationship between the analysed indicators using the non-parametric Spearman correlation coefficient. The main indicators of a healthy undergrowth are identified: size structure (proportion of small, medium, and large plants), species composition, density, and distribution. Differences in the process of reforestation in the sub-taiga pine forests on the left and right banks are revealed due to the proximity to plantations in the forest-steppe and mountain taiga zones, respectively. A significant correlation has been established between the abundance of pine seedlings in the left bank pine forests, their distribution (pattern of placement), and the level of human disturbance of plantations. The success of natural regeneration is assessed, and measures to enhance the reforestation capacity of recreational pine forests are proposed.

Keywords: *subtaiga, pine forests, recreational disturbance, undergrowth, success of reforestation, methods of reforestation*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their con-tribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Evdokimova L.S., Tatarintsev A.I., Zlenko L.V., Polonskaya L.A. (2025). Assessment of natural regeneration in recreational pine forests in the western part of the forest park green belt in Krasnoyarsk. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 58-76 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/4.

Received 18.06.2025. ***Revised*** 26.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

екреационное лесопользование составляет важный компонент экосистемных услуг, предоставляемых природными территориями в регионах с высокой долей урбанизированных ландшафтов [1,2]. Исследования последних лет демонстрируют, что рекреационный потенциал лесов включает не только социально-культурные функции, но и вносит значительный вклад в экономику региона через повышение туристической привлекательности и создание рекреационной инфраструктуры [3,4]. При этом рекреационная нагрузка требует научно обоснованного регулирования, поскольку превышение допустимых нормативов может привести к деградации почвенного покрова, нарушению естественного возобновления древесных пород и снижению биоразнообразия 5,6]. Особую актуальность эти вопросы приобретают в условиях интенсивного освоения пригородных территорий, где рекреационное лесопользование становится компромиссом между сохранением экологических функций лесов и удовлетворением рекреационных потребностей населения. Это в полной мере относится к наиболее освоенной и заселенной части Средней Сибири, включающей центральную группу районов Красноярского края, тяготеющих к крупной урбоэкосистеме – г. Красноярску. Окружающие Красноярск леса входят в лесопарковый зеленый пояс города согласно Постановлению Правительства Красноярского края от 14.05.2019 № 255-п (2019) [7], представлены характерной мозаикой лесных формаций, большей частью используются в рекреационных целях. Наиболее активная рекреационная деятельность в разных формах её проявления осуществляется в сосновых, сосново-березовых лесных насаждениях.

Рассматриваемый вид пользования лесом имеет весьма позитивное валеологическое значение для народонаселения, в то же время рекреационные нагрузки оказывают негативное воздействие на леса, снижая их устойчивость [8, 9, 10]. Рекреация уменьшает мощность подстилки и увеличивает долю поврежденных деревьев [11]. Рекреационная нагрузка приводит к уничтожению специфической лесной среды [12, 13]. Рекреация, как значимый экологический фактор, во-первых, приводит к непосредственному механическому повреждению всех компонентов лесных биогеоценозов, в частности фитоценозов, во-вторых, влияет на них через изменение экологических условий местообитания [14, 15].

Одним из главных вопросов экологических последствий лесной рекреации является её влияние на естественное лесовозобновление, которое отражает репродуктивную способность лесообразующих видов древесных растений (эдификаторов лесного сообщества) и устойчивость лесных экосистем [16,17]. Многочисленные исследования демонстрируют, что рекреационная нагрузка приводит к существенным изменениям физико-химических свойств почвы, включая уплотнение поверхностного горизонта, снижение инфильтрационной способности и ухудшение аэрации корнеобитаемого слоя [18-20]. Эти изменения непосредственно влияют на процессы прорастания семян и начальные этапы развития самосева древесных пород. Установлено, что даже умеренная рекреационная нагрузка (до 5-8 посещений на га в день) может снижать плотность подроста основных лесообразующих пород на 25-40% по сравнению с ненарушенными участками [23,24].

Вариация в составе сообщества растений между сменами была связана в первую очередь с факторами уровня участка, такими как уплотнение почвы, текстура и водоудерживающая способность, а не ландшафт [21]. В связи с этим, при проведении комплексного мониторинга состояния рекреационно-нарушенных лесных насаждений необходима оценка показателей естественного возобновления.

Предшествующие исследования процессов естественного возобновления в пригородных рекреационных лесах Красноярска были в основном сосредоточены на лесостепных сосняках и выявили значительные нарушения в ходе лесовозобновительного процесса под влиянием рекреационной нагрузки. Научной общественностью разработан комплекс

инструментов и методических подходов, направленных на восстановление ценных лесных экосистем, подверженных рекреационному воздействию. Однако для разработки эффективных мер управления необходимо углубленное изучение региональных особенностей динамики возобновительных процессов в условиях различных типов рекреационного использования. Подобных исследований в наиболее рекреационно-задействованных подтаежных сосняках весьма недостаточно.

Цель данной работы – оценить естественное возобновление рекреационных сосняков в подтаежных лесах (экотон лесостепь-тайга), расположенных в западной части лесопаркового зеленого пояса города Красноярска. Исходя из этого, решались задачи: установить основные характеристики подроста, определить успешность естественного возобновления и возможные способы лесовосстановления в рекреационных сосняках.

Материалы и методы

Исследования выполнены в вегетационный период (июнь-август) 2024 года в сосняках, произрастающих в слое подтаежных лесов западной части лесопаркового зеленого пояса г. Красноярска. Насаждения приурочены к долине реки Енисей, расположены на её левом и правом берегах; согласно схеме лесорастительного районирования, предложенной И.А. Коротковым (1994) [25], относятся к подзоне южной тайги и подтайги Зауральско-Енисейской лесорастительной провинции (ЛП) и подтаежному сосновому поясу Восточно-Саянской ЛП. В связи с наибольшей привлекательностью для отдыха народонаселения изучаемые сосняки на протяжении многих лет подвержены рекреационным нагрузкам различной интенсивности.

В сосновых насаждениях, руководствуясь методикой Е.Г. Мозолевской с соавторами (1984) [26], было заложено 12 безразмерных пробных площадей (ПП) по непровешенной ходовой линии (по шесть ПП в левобережных и правобережных относительно р. Енисей сосняках). Для закладки пробных площадей подбирались наиболее характерные лесные участки, сопоставимые по лесоводственно-таксационным показателям и в тоже время различающиеся по степени рекреационной нагрузки и контакту с пограничными лесорастительными зонами относительно рассматриваемого экотона (подтайга). Их общее количество (12 шт.) соответствует объему малой выборки. Размеры пробных площадей определяли навигатором GARMIN GPS 72. Насаждения на ПП относятся к одному типу леса (сосняки осочково-разнотравные), основные их лесоводственно-таксационные показатели приведены в таблице 1.

реационную нарушенность (стадию дигрессии) насаждений на пробных площадях определяли по относительной площади вытоптанного до минерального горизонта живого напочвенного покрова, используя трансектный метод в соответствии с ОСТ 56-100-95 (1995) [27]. Выделяемые градации рекреационной нарушенности насаждений следующие: I стадия дигрессии – относительная площадь вытоптанной поверхности напочвенного покрова до 1,0 %; II стадия дигрессии – 1,1-5,0 %; III стадия дигрессии – 5,1-10,0 %; IV стадия дигрессии – 10,1-25,0 %; V стадия дигрессии – более 25,0 %. При сравнительном анализе использовали процентные значения нарушенности.

На пробных площадях проведен учет подроста по методике, изложенной в Правилах лесовосстановления (2021) [28]. Для этого в пределах каждой ПП на лентах шириной 5 м по диагоналям участков закладывали 30 учетных площадок размером 10 м2 (2 м × 5 м) с расстоянием между ними 10 м. При невозможности заложить все площадки на диагональных лентах, недостающие площадки закладывали на лентах по периметру ПП. На площадках учитывался только жизнеспособный подрост с подразделением по высоте на три категории крупности: мелкий – до 0,5 м, средний – 0,6-1,5 м, крупный – более 1,5 м. Всходы не учитывались, так как по мнению П.А. Цветкова и Д.А. Киришевой (2004) [20] рекреационное лесопользование не позволяет им переходить в стадию подроста из-за максимального риска гибели.

Для перевода подроста в категорию крупного применяли пересчетные коэффициенты: для мелкого подроста – 0,5, для среднего – 0,8.

Дополнительно на пробных площадях рассчитывали встречаемость подроста как отношение количества учетных площадок с подростом к общему их заложенному количеству (30 шт.). По значению встречаемости оценивали характер размещения подроста по площади: встречаемость более или равна 65 % – равномерное размещение, 40-65 % – неравномерное, менее 40 % – групповое.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационная характеристика насаждений на пробных площадях

Table 1

Forestry and taxation characteristics of plantings on trial areas

Пробная площадь*, координаты** | Trial area*, coordinates**	Состав*** | Composition***	Возраст, лет | Age, years	Высота, м | Height, m	Диаметр, см | Diameter, cm	Бонитет | Bonitet	Полнота | stand density
Левый берег р. Енисей | The left bank of the Yenisei River						
К1 | K1 N 55˚57,998' E 92˚36,314'	10С | 10Р	115	23	37,5	3	0,7
К2 | K2 N 55˚58,090' E 92˚36,683'	10С | 10Р	130	25	31,0	3	0,5
К3 | K3 N 55˚58,165' E 92˚36,993'	10С+Б | 10Р+В	130	26	42,8	2	0,6
Кд1 | Kd1 N 55˚58,182' E 92˚37,240'	10С | 10Р	130	26	35,7	2	0,6
Кд2 | Kd2 N 55˚58,251' E 92˚37,286'	10С | 10Р	130	26	37,3	2	0,8
Кд3 | Kd3 N 55˚58,266' E 92˚37,370'	10С | 10Р	130	26	35,9	2	1,0
Правый берег р. Енисей | The right bank of the Yenisei River						
Дд1 | Dd1 N 55˚56,799' E 92˚23,100'	10С+Б, Лц | 10Р+В, L	170	26	35,0	3	0,4
Дд2 | Dd2 N 55˚56,783' E 92˚23,067'	10С+Б, Лц | 10Р+В, L	170	26	38,0	3	0,5
Дг1 | Dg1 N 55˚57,794' E 92˚22,585'	10С+Б, Лц | 10Р+В, L	170	26	38,7	3	0,7
Дг2 | Dg2 N 55˚57,808' E 92˚23,143'	10С+Б, Лц | 10Р+В, L	170	26	38,4	3	0,5
Нп1 | Np1 N 55˚58,196' E 92˚37,304'	10С+Лц | 10Р+L	160	23	29,3	3	0,6
Нп2 | Np2 N 55˚56,049' E 92˚44,350'	10С+Лц | 10Р+L	160	27	43,8	2	0,8

* К1-3, Кд1-3 в границах Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М.Ф. Решетнева; Дд1,2 – Дивногорского участкового лесничества Красноярского лесничества; Дг1,2 – внутригородских зеленых насаждений г. Дивногорска; Нп1,2 – туристско-экскурсионного района Национального парка «Красноярские Столбы»

* K1-3, Kd1-3 within the boundaries of the Karaulny forestry of the Educational and Experimental Forestry of the SibGU named after M.F. Reshetnev; Dd1,2 – Divnogorsky district forestry of the Krasnoyarsk Forestry; Dg1,2 – inner-city green spaces of Divnogorsk; Np1,2 – tourist and excursion area of the Krasnoyarsk Pillars (Stolby) National Park

** N - широта, E - долгота

** N - latitude, E - longitude

***С – сосна, Б – береза, Лц – лиственница

***C – pine, B – birch, L – larch

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculation

Таблица 2

Рекреационная нарушенность насаждений на пробных площадях

Table 2

Recreational disturbance of plantings on trial areas

Пробная площадь* | Trial area*	Относительная площадь вытоптанной поверхности живого напочвенного покрова, % | The relative area of the trampled surface of the living ground cover, %	Стадия дигрессии | The stage of digression
Левый берег р. Енисей | The left bank of the Yenisei River		
К1 | K1	23	IV
К2 | K2	18	IV
К3 | K3	28	V
Кд1 | Kd1	40	V
Кд2 | Kd2	11	IV
Кд3 | Kd3	1	I
Правый берег р. Енисей | The right bank of the Yenisei River		
Дд1 | Dd1	6	III
Дд2 | Dd2	1	I
Дг1 | Dg1	11	IV
Дг2 | Dg2	15	IV
Нп1 | Np1	6	III
Нп2 | Np2	1	I

* К1-3, Кд1-3 в границах Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза Сиб-ГУ им. М.Ф. Решетнева; Дд1,2 – Дивногорского участкового лесничества Красноярского лесничества; Дг1,2 – внутригородских зеленых насаждений г. Дивногорска; Нп1,2 – туристско-экскурсионного района Национального парка «Красноярские Столбы»

* K1-3, Kd1-3 within the boundaries of the Karaulny forestry of the Educational and Experimental Forestry of the SibGU named after M.F. Reshetnev; Dd1,2 – Divnogorsky district forestry of the Krasnoyarsk Forestry; Dg1,2 – inner-city green spaces of Divnogorsk; Np1,2 – tourist and excursion area of the Krasnoyarsk Pillars (Stolby) National Park

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculation

Таблица 3

Количество и состав подроста (жизнеспособный в пересчете на крупный)

Table 3

Number and composition of undergrowth (reliable in terms of large)

Пробная площадь* | Trial area*	Распределение подроста по породам, шт./га | Distribution of undergrowth by species, p/h								Формула состава подроста** | The formula for the composition of undergrowth**
	сосна | pine tree	пихта | fir tree	кедр | Siberian cedar pine	ель | fir	лиственница | larch tree	береза | birch tree	осина | aspen	всего | total	
Левый берег р. Енисей | The left bank of the Yenisei River									
К1 | K1	2000							2000	10С | 10Р
К2 | K2	21496	866	756	26	26			22366	10С+П,К, ед.Е,Лц | 10P+F,C, single S,L
К3 | K3	4473	126	66	213				4866	10С+Е,П, ед.К | 10P+S,F, single C
РКд1 | Kd1	1930	50	166	106		966		3200	6С3Б1К+Е, ед.П | 6P3B1C+S, single F
Кд2 | Kd2	5120	130	60	76	16	1300		6700	8С2Б+П, ед.Е,К, Лц | 8P2B+F, single F,C,L
Кд3 | Kd3	23460	450	70	26		2763		26766	9С1Б+П, ед.Е,К | 9P1B+F, single S,C
Правый берег р. Енисей | The right bank of the Yenisei River									
Дд1 | Dd1	466	4406		16		170	223	5266	9П1С+Ос,Б, ед.Е | 9F1P+A, B, single F
Дд2 | Dd2	596	610				33		1233	5П5С+Б | 5F5P+B
Дг1 | Dg1	116	10186		830				11133	9П1Е, ед.С | 9F1S, single P
Дг2 | Dg2	526	460	276	93				1333	4С3П2К1Е | 4P3F2C1S
Нп1 | Np1	3103	12106	490	776	160	1423	2640	20700	6П2С1Ос1Б+Е,К,ед.Лц | 6F2P1A1B+S,C, single L
Нп2 | Np2		12096	16	1823			76	14000	9П1Е, ед.К,Ос | 9F1S, single L

* К1-3, Кд1-3 в границах Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М.Ф. Решетнева; Дд1,2 – Дивногорского участкового лесничества Красноярского лесничества; Дг1,2 – внутригородских зеленых насаждений г. Дивногорска; Нп1,2 – туристско-экскурсионного района Национального парка «Красноярские Столбы»

* K1-3, Kd1-3 within the boundaries of the Karaulny forestry of the Educational and Experimental Forestry of the SibGU named after M.F. Reshetnev; Dd1,2 – Divnogorsky district forestry of the Krasnoyarsk Forestry; Dg1,2 – inner-city green spaces of Divnogorsk; Np1,2 – tourist and excursion area of the Krasnoyarsk Pillars (Stolby) National Park

**С – сосна, Б – береза, Лц – лиственница, К – кедр, Е – ель, П – пихта, Ос – осина, ед. - единично

**C – pine, B – birch, L – larch, C – cedar, S – spruce, F - fir tree, A – aspen, single

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculation

Количество жизнеспособного подроста (в переводе на крупный) на каждом участке пересчитывали на 1 га, исходя из данных о количестве такового подроста на 30-ти учетных площадках размером 10 м^2. Формулу состава подроста определяли по доле участия каждой породы в суммарном количестве жизнеспособного подроста.

Способы лесовосстановления в зависимости от количества жизнеспособного подроста основных

лесных древесных пород определялись по требованиям к лесовосстановлению в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе согласно Правил лесовосстановления (2021) [28].

Взаимосвязь анализируемых показателей оценивали по непараметрическому коэффициенту Спирмена (R_{sp}), исходя из малого объема выборки. Статистические расчеты проводили с помощью программного обеспечения STATISTICA 10.

Результаты и их обсуждение

Близость мегаполиса и транспортная доступность лесов лесопаркового зеленого пояса города Красноярска определяют высокую степень их рекреационного использования. Наибольшим нагрузкам подвержены лесные насаждения с доминированием в составе древостоев сосны обыкновенной, что обусловлено их преобладающим присутствием в полосе непосредственного примыкания к территории города и сопутствующих населенных пунктов, привлекательностью для активного отдыха. Степень их антропогенной нарушенности (дигрессии) зависит от режима лесопользования (в соответствии с ведомственным подчинением), обустройством лесных участков для целей отдыха, интенсивности рекреационных нагрузок. Рекреационная дигрессия в изучаемых сосняках в соответствии с принятой шкалой варьирует от начальной до максимальной стадии (таблица 2). Повышенной нарушенностью в исследуемой выборке лесных участков отличаются сосновые насаждения на прибрежных террасах левобережной части, в которых преобладает неорганизованная рекреационная деятельность, включая наиболее агрессивную по отношению к лесным экосистемам форму – транспортную бездорожную рекреацию.

Количественные показатели жизнеспособного подроста на обследованных участках неравнозначны (таблицы 3, 4; рисунок 1). Это связано с влиянием на лесовозобновительный процесс комплекса лесоводственно-экологических факторов, качественные и количественные параметры которых в большей или меньшей степени различаются в изучаемых сосняках. К таким факторам следует отнести: эдафо-орографические условия, лесоводственно-таксационные показатели насаждений, интенсивность рекреационной нагрузки.

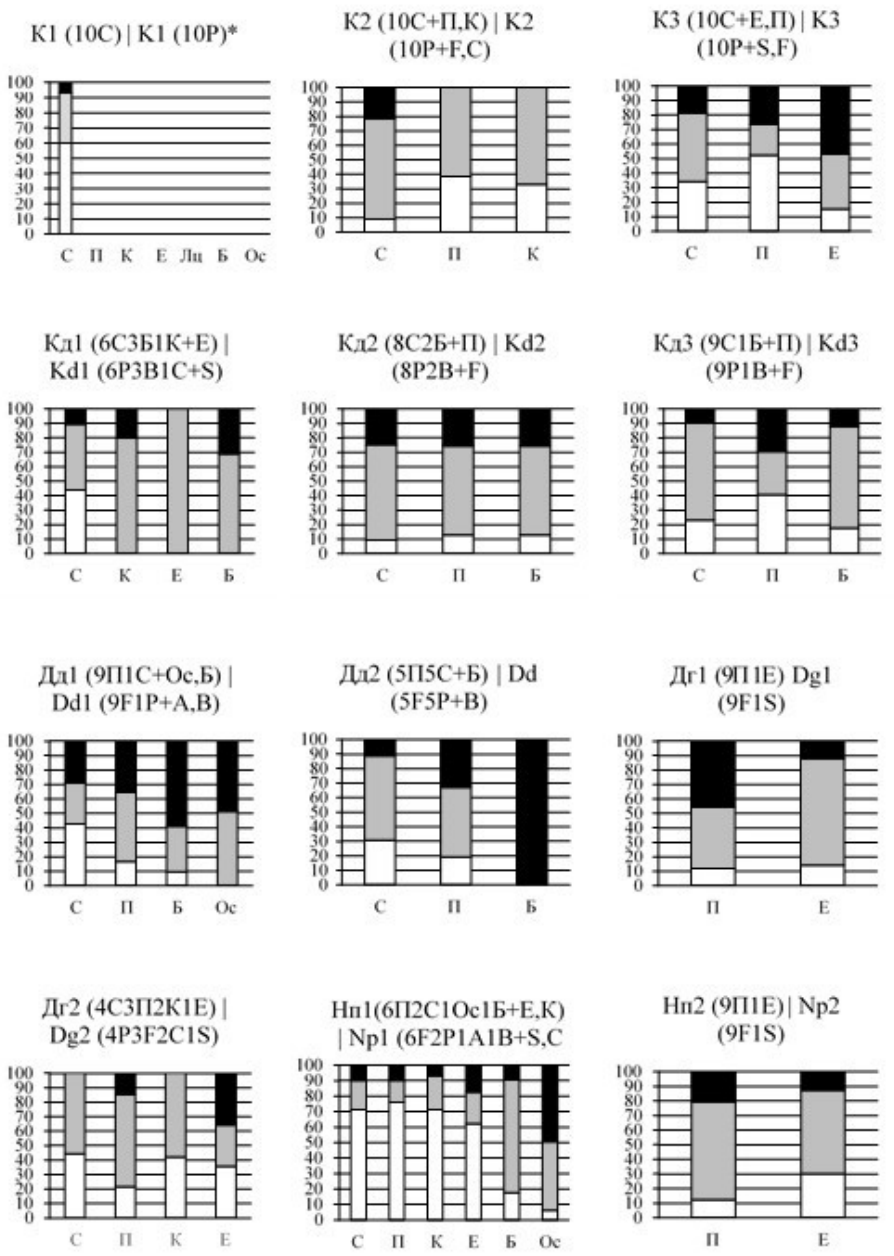


Рисунок 1. Распределение подроста по категориям крупности (ось X – распределение по породам: С – сосна, П – пихта, К – кедр, Е – ель, Б – береза, Ос – осина; ось Y – доля подроста, %: мелкого – белый цвет, среднего – серый, крупного – черный)

*ПП (формула состава подроста без единично представленных видов)

Figure 1. Distribution of undergrowth by size categories (X–axis – distribution by species: C - pine, P – fir, K – cedar, E – spruce, B – birch, Os – aspen; Y–axis - percentage of undergrowth, %: small – white, medium – gray, large – black)

*TA (formula for the composition of undergrowth without individually represented species)

** К1-3, Кд1-3 в границах Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М.Ф. Решетне-ва; Дд1,2 – Дивногорского участкового лесничества Красноярского лесничества; Дг1,2 – внутригородских зеленых насаждений г. Дивногорска; Нп1,2 – туристско-экскурсионного района Национального парка «Красноярские Столбы»

** К1-3, Кd1-3 within the boundaries of the Karaulny forestry of the Educational and Experimental Forestry of the SibGU named after M.F. Reshetnev; Dd1,2 – Divnogorsky district forestry of the Krasnoyarsk Forestry; Dg1,2 – inner-city green spaces of Divnogorsk; Np1,2 – tourist and excursion area of the Krasnoyarsk Pillars (Stolby) National Park

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Таблица 4

Распределение подроста по площади

Table 4

Distribution of undergrowth by area

Пробная площадь* | Trial area*	Встречаемость, % | the occurrence of undergrowth, %	Характер распределения | The nature of the distribution
Левый берег р. Енисей | The left bank of the Yenisei River		
К1 | К1	15	групповой | group
К2 | К2	96	равномерный | uniform
К3 | К3	33	групповой | group
Кд1 | Kd1	16	групповой | group
Кд2 | Kd2	43	неравномерный | uneven
Кд3 | Kd3	100	равномерный | uniform
Правый берег р. Енисей | The right bank of the Yenisei River		
Дд1 | Dd1	76	равномерный | uniform
Дд2 | Dd2	65	равномерный | uniform
Дг1 | Dg1	57	неравномерный | uneven
Дг2 | Dg2	3	групповой | group
Нп1 | Np1	100	равномерный | uniform
Нп2 | Np2	100	равномерный | uniform

* К1-3, Кд1-3 в границах Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М.Ф. Решетнева; Дд1,2 – Дивногорского участкового лесничества Красноярского лесничества; Дг1,2 – внутригородских зеленых насаждений г. Дивногорска; Нп1,2 – туристско-экскурсионного района Национального парка «Красноярские Столбы»

* К1-3, Кd1-3 within the boundaries of the Karaulny forestry of the Educational and Experimental Forestry of the SibGU named after M.F. Reshetnev; Dd1,2 – Divnogorsky district forestry of the Krasnoyarsk Forestry; Dg1,2 – inner-city green spaces of Divnogorsk; Np1,2 – tourist and excursion area of the Krasnoyarsk Pillars (Stolby) National Park

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculation

В состав подроста, кроме сосны, входят иные древесные виды, в том числе темнохвойные породы (таблица 3). Такую тенденцию к повышению разнообразия видов в экотонной зоне (в нашем случае – подтаежные леса) относят к проявлению краевого эффекта [29]. При этом в левобережной части сосняков, приближенных к сосново-березовым лесам лесостепной зоны, в составе подроста абсолютно доминирует (представленность 60-100 %) сосна обыкновенная. Иная ситуация в правобережных сосняках, контактирующих с темнохвойными горно-таежными лесами. Здесь сосна вытесняется темнохвойными видами (пихтой,

елью, кедром), в большинстве случаев в подросте доминирует пихта (представленность до 90 %).

На рисунке 1 приведены диаграммы распределения подроста по градациям крупности за минусом единично представленных в его составе древесных видов. На большинстве участков суммарная доля среднего и крупного подроста доминирующих древесных пород преобладает (55-90 %) с заметно большей численностью средних по размеру растений. На двух участках (ПП К1, Нп1) доля среднего и крупного подроста главных хвойных пород (сосны, пихты) – ≤ 40 % (рисунок 1). На первом из них (ПП К1), это в сочетании с низкой абсолютной численностью подроста (см. таблица 3) связано с повышенной транспортной бездорожной рекреацией. На втором участке (ПП Нп1) – с процессом активного появления молодого подроста вследствие снижения интенсивной антропогенной нагрузки на насаждения после рекреационного обустройства туристической тропы. При этом для совокупности изучаемых лесных участков значимой связи относительного количества подроста разной крупности с рекреационной нарушенностью насаждений не выявлено (таблица 5).

Таблица 5

Корреляция (по коэффициенту R_{sp}) показателей естественного возобновления (жизнеспособного подроста в переводе на крупный) с показателями рекреационных насаждений (древостоев) сосны

Table 5

Correlation (by the R_{sp} coefficient) of indicators of natural regeneration (reliable undergrowth translated into large) with indicators of recreational stands of pine

Показатели возобновления | Renewal rates	Показатели насаждений (древостоев) |					
	возраст | age	диаметр | diameter	высота | height	полнота | completeness	бонитет | bonitet	рекреационная нарушенность | recreational disturbance
количество всего подроста | the total number of undergrowth	-0,2000	-0,3427	-0,0751	0,4307	-0,2203	-0,3216
доля подроста: | percentage of undergrowth						
- мелкий | small	-0,0704	-0,0280	-0,3879	-0,1424	0,1714	0,2120
- средний | average	-0,1444	-0,0140	0,4254	0,1566	-0,4162	-0,1979
- крупный | large	0,3851	0,0420	0,3128	-0,1317	0,0734	-0,2297
встречаемость подроста | occurrence of undergrowth	0,1417	-0,2958	0,0756	0,2007	-0,0740	**-0,7331***

* значимые коэффициенты корреляции ($p < 0,05$)

* significant correlation coefficients ($p < 0.05$)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculation

Таблица 6

Оценка успешности лесовозобновления и рекомендуемые способы лесовосстановления на лесных участках

Table 6

Assessment of the success of reforestation and recommended methods of reforestation in forest areas

ПП | Trial area	Показатели благонадежного подроста | Indicators of trustworthy undergrowth		Способы лесовосстановления (основание по количеству жизнеспособного подроста для разнотравной группы типов леса, тыс.шт./га)* | Methods of reforestation (based on the number of viable undergrowth for a diverse group of forest types, thousand units/ha)
	состав (без единичных пород) | composition (without single rocks)	количество, тыс.шт./га | quantity, thousand units/ha	
Левый берег р. Енисей | The left bank of the Yenisei River			
К1 | K1	10С | 10P	2,0	минерализация почвы (2-3) | soil mineralization (2-3)
К2 | K2	10С+П,К | 10P+F,C	22,4	сохранение подроста (> 3,0) | undergrowth conservation (> 3,0)
К3 | K3	10С+Е,П | 10P+S,F	4,9	сохранение подроста (> 3,0) | undergrowth conservation (> 3,0)
Кд1 | Kd1	6С3Б1К+Е | 6P3B1C+S	3,2	сохранение подроста (> 3,0) | undergrowth conservation (> 3,0)
Кд2 | Kd2	8С2Б+П | 8P2B+F	6,7	сохранение подроста (> 3,0) | undergrowth conservation (> 3,0)
Кд3 | Kd3	9С1Б+П | 9P1B+F	26,8	сохранение подроста (> 3,0) | undergrowth conservation (> 3,0)
Правый берег р. Енисей | The right bank of the Yenisei River			
Дд1 | Dd1	9П1С+Ос,Б | 9F1P+A, B	5,3	сохранение подроста (> 2,5) | undergrowth conservation (> 2,5)
Дд2 | Dd2	5П5С+Б | 5F5P+B	1,2	комбинированное (1-2) | combined (1-2)
Дг1 | Dg1	9П1Е | 9F1S,	11,1	сохранение подроста (> 2,5) | undergrowth conservation (> 2,5)
Дг2 | Dg2	4С3П2К1Е | 4P3F2C1S	1,3	комбинированное (1-2) | combined (1-2)
Нп1 | Np1	6П2С1Ос1Б+Е,К | 6F2P1A1B+S,C	20,7	сохранение подроста (> 2,5) | undergrowth conservation (> 2,5)
Нп2 | Np2	9П1Е | 9F1S	14,0	сохранение подроста (> 2,5) | undergrowth conservation (> 2,5)

* Согласно Приложению 22 «Требования (критерии) к лесовосстановлению в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе» к Правилам лесовосстановления, принятым Приказом Минприроды России от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления» [16]

* According to Appendix 22 "Requirements (criteria) for reforestation in the Central Siberian Subtaiga-forest-steppe region" to the Rules of Reforestation, adopted by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated December 29, 2021 No. 1024 "On approval of the Rules of reforestation, form, composition, procedure for approving the reforestation project, grounds for refusal to approve it, as well as requirements for the format in electronic in the form of a reforestation project" [16]

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculation

Суммарное количество жизнеспособного подроста (в переводе на крупный) в исследованной выборке насаждений варьирует от 1,2 тыс.шт./га (ПП Дд2) до 26,8 тыс.шт./га (ПП Кд3) (таблица 3). Количество такого подроста в среднем больше в левобережной части (11 тыс.шт./га с доминированием сосны), для правобережной части этот показатель – 8,9 тыс.шт./га с преобладанием пихты. При том что рекреационная нарушенность сосняков левобережья выше в сравнении с насаждениями правобережья, очевидно на лесовозобновительный процесс, кроме рекреационной нагрузки, большое влияние оказывают лесорастительные условия, конкурентные фитогенные взаимодействия за ресурсы среды (свет – лимитированное его поступление в нижние ярусы растительности, почва – конкуренция со стороны растений живого напочвенного покрова).

В пределах совокупной выборки не установлено значимой связи количества жизнеспособного подроста с рекреационной нарушенностью (таблица 5). Учитывая ранее обсуждаемую разнородность опытных участков левобережной и правобережной частей по лесорастительным условиям и показателям (в частности составу) подроста, дополнительно выполнен анализ данных только для наиболее близких по этим параметрам левобережных лесных участков. При этом важно напомнить, что в этих сосняках максимально доминирует в составе подроста сосна обыкновенная. В пределах левобережной выборки установлена значимая обратная связь (R_{sp} = -0,8857, p < 0,05) между рекреационной нарушенностью насаждений и количеством жизнеспособного (в переводе на крупный) подроста сосны, что указывает на достоверное уменьшение количества подроста по мере повышения рекреационной нагрузки на сосняки.

Значения встречаемости подроста (3-100%, в среднем 59 %) на пробных площадях характеризуют разные варианты его размещения на обследованных участках рекреационных сосняков (таблица 4). При низких уровнях рекреационных нагрузок, соответственно меньшей дигрессии насаждений, характер размещения подроста равномерный или близок к равномерному. Интенсификация нагрузок, увеличение количества троп, повышение площади дорожно-тропиночной сети приводят к фрагментации растительности, в первую очередь нижних ярусов фитоценозов; размещение подроста становится неравномерным, в крайних случаях – групповым. Эту тенденцию в изучаемых сосняках подтверждает значимая отрицательная связь встречаемости подроста с рекреационной нарушенностью насаждений (таблица 5).

Исходя из данных проведенных исследований и основываясь на нормативных требованиях [28], выполнен анализ успешности лесовозобновления в исследуемых насаждениях с учетом количественных показателей подроста доминирующих видов с обозначением пригодных для соответствующей ситуации лесовосстановительных мероприятий (таблица 6). Для создания условий успешного лесовозобновления, лесовосстановления на объектах исследований, кроме мероприятий по снижению негативного воздействия рекреационных нагрузок на насаждения, в большинстве случаев целесообразны меры по содействию естественному лесовозобновлению: сохранение подроста, минерализация почвы. На отдельных участках (правобережные рекреационные сосняки) рекомендуется комбинированное лесовосстановление с подсадкой подпологовых лесных культур с использованием посадочного материала соответствующих лесорастительным условиям хвойных видов.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Антропогенная нарушенность рекреационных сосняков в подтаежной части зеленого пояса г. Красноярска на разных участках варьирует от начальной до максимальной стадии. Повышенной нарушенностью отличаются сосновые насаждения на прирусловых террасах левобережной части относительно р. Енисей.

2. Видовой состав подроста в рекреационных сосняках экотонной полосы - подтайги обусловлен близостью насаждений контактирующих лесорастительных зон. В левобережных подтаежных сосняках, примыкающих к насаждениям лесостепной зоны, в составе подроста доминирует сосна; в подобных сосняках правобережной части, граничащих с темнохвойными горно-таежными лесами, в подросте преобладают темнохвойные виды, в первую очередь пихта.

3. В размерной структуре подроста доминирующих видов в большинстве случаев преобладает средний подрост в сочетании с крупным. На участках восстановления нижнего яруса фитоценозов после интенсивных рекреационных нагрузок преобладает мелкий подрост.

4. Количество жизнеспособного подроста (в переводе на крупный) в изучаемых сосняках варьирует в пределах 1,2 – 26,8 тыс.шт./га, что обусловлено влиянием лесорастительных условий, конкурентными взаимоотношениями подроста с другими представителями фитоценоза, интенсивностью рекреационной нагрузки. Для сосняков левобережной части установлена значимая обратная связь количества соснового подроста с рекреационной нарушенностью насаждений.

5. Рекреационные нагрузки значимо влияют на встречаемость подроста (характер размещения). При повышении рекреационных нагрузок (соответственно нарушенности насаждений) равномерное размещение подроста переходит в неравномерное, при высоких стадиях рекреационной дигрессии насаждений размещение подроста – групповое.

6. В соответствии с нормативными критериями к лесовосстановлению в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе лесовозобновление, исходя из количества жизнеспособного подроста, в рекреационных сосняках – достаточно успешное. На большинстве участков рекомендованы меры по сохранению подроста, в отдельных случаях – минерализация почвы, дополнительная подсадка саженцев соответствующих хвойных видов.

Дальнейшие исследования по данной проблеме должны быть направлены на изучение динамики лесовозобновительных процессов с учетом эдафо-орографических условий произрастания рекреационных сосняков, разработку технологии мероприятий для оптимизации лесовозобновления (лесовосстановления) в сосняках с разным уровнем рекреационных нагрузок.

.

Список литературы

1. Зиновьева А.Е. К вопросу классификации экосистемных услуг // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2020. – № 1 (56). – С. 5-13. – DOI: http://doi.org/10.24411/2410-1192-2020-15601.
2. Atalay, A., Perkumiene, D., Aleinikovas, M., & Škėma, M. (2024). Clean and sustainable environment problems in forested areas related to recreational activities: case of Lithuania and Turkey. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1224932
3. Rysin L.P., Savel'eva L.I., Rysin S.L. Forest monitoring in urbanized areas. Russian Journal of Ecology. – 2004. – Vol. 35, No. 4. – P. 209-213. – DOI: http://doi.org/10.1023/B:RUSE.0000033787.32574.dd.
4. Saklaurs M., Libiete Z., Donis J., Kitenberga M., Elferts D., Jurmalis E., Jansons A. Provision of Ecosystem Services in Riparian Hemiboreal Forest Fixed-Width Buffers. Forests. 2022; 13: 928. – DOI: http://doi.org/10.3390/f13060928.
5. Jenkins M.B., Schoettle A.W., Wright J.W., Anderson K.A., Fortier J., Hoang L., Incashola T.J., Keane R.E., Krakowski J., LaFleur D.M., Mellmann-Brown S., Meyer E.D., Pete S., Renwick K., Sissons R.A. Restoring a forest keystone species: A plan for the restoration of whitebark pine (Pinus albicaulis Engelm.) in the Crown of the Continent Ecosystem. Forest Ecology and Management. 2022; 522: 120282. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120282.
6. Day M.A., Tortorelli C.M., Ellsworth L.M., Short K.C., Brown J.L., Koutzoukis S., Olszewski J., Ager A.A., Chambers J.C. Optimizing woody fuel treatments to reduce wildfire risk to sagebrush ecosystems in the Great Basin

of the western US. Journal of Environmental Management. 2025; 392: 126672. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126672.
7. Постановление Правительства Красноярского края от 14.05.2019 № 255-П «Об установлении границ лесопаркового зеленого пояса города Красноярска» (ред. от 16.07.2024) // URL: http://www.zakon.krskstate.ru/0/doc/57764.
8. Wolf, K. L., Lam, S. T., McKeen, J. K., Richardson, G. R. A., van den Bosch, M., & Bardekjian, A. C. (2020). Urban Trees and Human Health: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4371. https://doi.org/10.3390/ijerph17124371
9. Referowska-Chodak, E. (2019). Management and Social Problems Linked to the Human Use of European Urban and Suburban Forests. *Forests*, *10*(11), 964. https://doi.org/10.3390/f10110964
10. Султанова Р.Р., Мартынова М.В. Основы рекреационного лесоводства: учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Лань, 2018. – 264 с. – ISBN 978-5-8114-2779-6.
11. Petrov, V., Ivanov, S., & Sidorova, A. (2020). Economic estimation of forest recreation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 574, Article 012063. https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012063
12. Shukel, I. V., & Hlohovskyi, L. V. (2024). The scale of recreational assessment of suburban forests in lviv (on the example of briukhovychi forestry). *Naukovì dopovìdì Nacìonal'nogo unìversitetu bìoresursiv ì prirodokoristuvannâ Ukraïni*, 108(2). https://doi.org/10.31548/dopovidi.2(108).2024.020
13. Sánchez J.J., Marcos-Martinez R., Soonsawad N., Srivastava L. Valuing the impacts of forest disturbances on ecosystem services: An examination of recreation and climate regulation services in U.S. national forests. Trees, Forests and People. 2021. 5: 100123. – URL: https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100123.
14. Wajchman-Świtalska, S., Zajadacz, A., Woźniak, M., Jaszczak, R., & Beker, C. (2022). Recreational Evaluation of Forests in Urban Environments: Methodological and Practical Aspects. *Sustainability*, *14*(22), 15177. https://doi.org/10.3390/su142215177
15. Krajewski, P., & Wójcik, A. (2024). Recreation in suburban forests - monitoring the distribution of visits using the example of Rzeszów. *Annals of Forest Research*, 67(1), 131-141. https://doi.org/10.15287/afr.2024.3499
16. Данчева А.В., Залесов С.В. Динамика естественного возобновления под пологом сосновых насаждений Казахского мелкосопочника // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2013. – № 3(27). – С. 126-128. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20353431.
17. Данчева А.В., Залесов С.В., Лучкина Н.В. и др. Естественное возобновление сосны в городских лесах города Тюмени (на примере экопарка "Затюменский") // Природообустройство. – 2022. – № 4. – С. 124-131. – DOI: https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-124-131.
18. Зарубина Л.В., Карбасников А.А., Пешин Д.А. Оценка возобновительных процессов под пологом приспевающих хвойных древостоев в Вологодской области // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 10-18. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-10-18.
19. Малиновских А.А. Оценка успешности естественного возобновления сосны обыкновенной в пригородных лесах Барнаула // Леса России и хозяйство в них. – 2024. – № 3(90). – С. 15-25. – DOI: 10.51318/FRET.2024.44.46.002.
20. Влияние рекреации на радиальный прирост сосны обыкновенной / В. С. Симоненков, В. А. Симоненкова, С. Р. Гилазиева [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 111-117. – DOI 10.18500/1816-9775-2024-24-1-111-117. – EDN YESMMV.
21. Conway E.E., Brudvig L. Local site conditions, not landscape context, influence restored plant communities within urban contexts. Restoration Ecology. 2024; 32 (4): e14109. – DOI: https://doi.org/10.1111/rec.14109.

22. Горбунов А.С., Цветков П.А. Естественное возобновление рекреационных сосняках зеленой зоны г.Красноярска // Хвойные бореальной зоны. – 2009. – Т. 26, № 2. – С. 244-248. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15195101.
23. Ерохина З.В., Пшеничникова Л.С. Влияние рекреации на нижние ярусы сосновых лесов заповедника "Столбы" // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Т. 27, № 3-4. – С. 317-323. – URL: https://forest-culture.narod.ru/HBZ/Stat_10_3-4/erohina17.pdf.
24. Keane R.E., Schoettle A.W., Tomback D.F. Effective actions for managing resilient high elevation five-needle white pine forests in western North America at multiple scales under changing climates. Forest Ecology and Management. 2022; 505: 119939. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119939.
25. Коротков И.А. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России. – Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 1994. – С. 29-47.
26. Мозолевская Е.Г., Катаев О.А., Соколова Э.С. Методы лесопатологических обследований очагов стволовых вредителей и болезней леса. – М.: Лесная промышленность, 1984. – 152 с.
27. Стандарт отрасли ОСТ 56-100-95 "Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы". – URL: https://internet.garant.ru/.
28. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29.12.2021 № 1024 «Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления». URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202110024.
29. Ren, F., Chen, L., Li, T., & Li, M. (2023). Spatial Changes of Suburban Forest Ecological Functions and Their Impact on Ecological Equity in the Process of Urbanization—A Case Study of Jiangning District, Nanjing, China. Forests, 14(7), 1308. https://doi.org/10.3390/f14071308

References

1. Zinovieva A. E. K voprosu klassifikatsii ekosistemnykh uslug. [On the classification of ecosystem services]. Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society. 2020;1(56):5-13. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.24411/2410-1192-2020-15601.
2. Atalay A., Perkumiene D., Aleinikovas M., Škėma M. Clean and sustainable environment problems in forested areas related to recreational activities: case of Lithuania and Turkey. Frontiers in Sports and Active Living. 2024;6. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1224932
3. Rysin L. P., Savel'eva L. I., Rysin S. L. Forest monitoring in urbanized areas. Russian Journal of Ecology. 2004;35(4):209-213. DOI: http://doi.org/10.1023/B:RUSE.0000033787.32574.dd
4. Saklaurs M., Libiete Z., Donis J., Kitenberga M., Elferts D., Jurmalis E., Jansons A. Provision of Ecosystem Services in Riparian Hemiboreal Forest Fixed-Width Buffers. Forests. 2022;13:928. DOI: http://doi.org/10.3390/f13060928
5. Jenkins M. B., Schoettle A. W., Wright J. W., Anderson K. A., Fortier J., Hoang L., Incashola T. J., Keane R. E., Krakowski J., LaFleur D. M., Mellmann-Brown S., Meyer E. D., Pete S., Renwick K., Sissons R. A. Restoring a forest keystone species: A plan for the restoration of whitebark pine (Pinus albicaulis Engelm.) in the Crown of the Continent Ecosystem. Forest Ecology and Management. 2022;522:120282. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120282
6. Day M. A., Tortorelli C. M., Ellsworth L. M., Short K. C., Brown J. L., Koutzoukis S., Olszewski J., Ager A. A., Chambers J. C. Optimizing woody fuel treatments to reduce wildfire risk to sagebrush ecosystems in the Great Basin of the western US. Journal of Environmental Management. 2025;392:126672. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126672
7. Postanovlenie Pravitel'stva Krasnoyarskogo kraya ot 14.05.2019 № 255-P «Ob ustanovlenii granits lesoparkovogo zelenogo povasa goroda Krasnoyarska» (red. ot 16.07.2024). [Decree of the Government of the Krasnoyarsk

Territory dated 14.05.2019 No. 255-P "On the establishment of the boundaries of the forest park green belt of the city of Krasnoyarsk" (as amended on 16.07.2024)]. URL: http://www.zakon.krskstate.ru/0/doc/57764

8. Wolf K. L., Lam S. T., McKeen J. K., Richardson G. R. A., van den Bosch M., Bardekjian A. C. Urban Trees and Human Health: A Scoping Review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020;17(12):4371. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph17124371
9. Referowska-Chodak E. Management and Social Problems Linked to the Human Use of European Urban and Suburban Forests. Forests. 2019;10(11):964. DOI: https://doi.org/10.3390/f10110964
10. Sultanova R. R., Martynova M. V. Osnovy rekreatsionnogo lesovodstva: uchebnik dlya vuzov. [Fundamentals of recreational forestry: textbook for universities]. 2nd ed. Saint Petersburg: Lan' Publ.; 2018. 264 p. (In Russ.). ISBN 978-5-8114-2779-6
11. Petrov V., Ivanov S., Sidorova A. Economic estimation of forest recreation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020;574:012063. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012063
12. Shukel I. V., Hlohovskyi L. V. THE SCALE OF RECREATIONAL ASSESSMENT OF SUBURBAN FORESTS IN LVIV (ON THE EXAMPLE OF BRIUKHOVYCHI FORESTRY). Naukovì dopovìdì Nacìonal′nogo unìversitetu bìoresursiv ì prirodokoristuvannâ Ukraïni. 2024;108(2). DOI: https://doi.org/10.31548/dopovidi.2(108).2024.020
13. Sánchez J. J., Marcos-Martinez R., Soonsawad N., Srivastava L. Valuing the impacts of forest disturbances on ecosystem services: An examination of recreation and climate regulation services in U.S. national forests. Trees, Forests and People. 2021;5:100123. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100123
14. Wajchman-Świtalska S., Zajadacz A., Woźniak M., Jaszczak R., Beker C. Recreational Evaluation of Forests in Urban Environments: Methodological and Practical Aspects. Sustainability. 2022;14(22):15177. DOI: https://doi.org/10.3390/su142215177
15. Krajewski P., Wójcik A. Recreation in suburban forests - monitoring the distribution of visits using the example of Rzeszów. Annals of Forest Research. 2024;67(1):131-141. DOI: https://doi.org/10.15287/afr.2024.3499
16. Dancheva A. V., Zalesov S. V. Dinamika estestvennogo vozobnovleniya pod pologom sosnovykh nasazhdeniy Kazakhskogo melkosopochnika. [Dynamics of natural regeneration under the canopy of pine plantations of the Kazakh small hills]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Bashkir State Agrarian University. 2013;3(27):126-128. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20353431
17. Dancheva A. V., Zalesov S. V., Luchkina N. V. et al. Estestvennoe vozobnovlenie sosny v gorodskikh lesakh goroda Tyumeni (na primere ekoparka "Zatyumenskiy"). [Natural regeneration of pine in urban forests of Tyumen (on the example of the Zatyumensky ecopark)]. Prirodoobustroystvo = Land Management. 2022;4:124-131. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-124-131
18. Zarubina L. V., Karbasnikov A. A., Peshin D. A. Otsenka vozobnovitel'nykh protsessov pod pologom prispevayushchikh khvoynykh drevostoev v Vologodskoy oblasti. [Assessment of renewal processes under the canopy of maturing coniferous stands in the Vologda region]. Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin = Forestry Bulletin. 2021;25(2):10-18. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-10-18
19. Malinovskikh A. A. Otsenka uspeshnosti estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovennoy v prigorodnykh lesakh Barnaula. [Assessment of the success of natural regeneration of Scots pine in suburban forests of Barnaul]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh = Forests of Russia and Management. 2024;3(90):15-25. (In Russ.). DOI: 10.51318/FRET.2024.44.46.002
20. Simonenkov V. S., Simonenkova V. A., Gilazieva S. R. et al. Vliyanie rekreatsii na radial'nyy prirost sosny obyknovennoy. [Influence of recreation on radial growth of Scots pine]. Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya = Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology. 2024;24(1):111-117. (In Russ.). DOI: 10.18500/1816-9775-2024-24-1-111-117
21. Conway E. E., Brudvig L. Local site conditions, not landscape context, influence restored plant communities within urban contexts. Restoration Ecology. 2024;32(4):e14109. DOI: https://doi.org/10.1111/rec.14109

22. Gorbunov A. S., Tsvetkov P. A. Estestvennoe vozobnovlenie rekreatsionnykh sosnyakakh zelenoy zony g. Krasnoyarska. [Natural regeneration in recreational pine forests of the green zone of Krasnoyarsk]. Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the Boreal Zone. 2009;26(2):244-248. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15195101
23. Erokhina Z. V., Pshenichnikova L. S. Vliyanie rekreatsii na nizhnie yarusy sosnovykh lesov zapovednika "Stolby". [Influence of recreation on the lower tiers of pine forests of the Stolby Nature Reserve]. Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the Boreal Zone. 2010;27(3-4):317-323. (In Russ.). URL: https://forest-culture.narod.ru/HBZ/Stat_10_3-4/erohina17.pdf
24. Keane R. E., Schoettle A. W., Tomback D. F. Effective actions for managing resilient high elevation five-needle white pine forests in western North America at multiple scales under changing climates. Forest Ecology and Management. 2022;505:119939. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119939
25. Korotkov I. A. Lesorastitel'noe rayonirovanie Rossii i respublik byvshego SSSR. [Forest vegetation zoning of Russia and the republics of the former USSR]. In: Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii: monografiya. Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN; 1994. p. 29-47. (In Russ.)
26. Mozolevskaya E. G., Kataev O. A., Sokolova E. S. Metody lesopatologicheskikh obsledovaniy ochagov stvolovykh vrediteley i bolezney lesa. [Methods of forest pathological surveys of foci of stem pests and forest diseases]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1984. 152 p. (In Russ.)
27. Standart otrasli OST 56-100-95 "Metody i edinitsy izmereniya rekreatsionnykh nagruzok na lesnye prirodnye kompleksy" (utv. prikazom Rosleskhoza ot 20 iyulya 1995 g. N 114). [Industry standard OST 56-100-95 "Methods and units for measuring recreational loads on forest natural complexes" (approved by order of the Federal Forestry Agency of July 20, 1995 No. 114)]. URL: https://internet.garant.ru/
28. Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 29.12.2021 № 1024 «Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya, formy, sostava, poryadka soglasovaniya proekta lesovosstanovleniya, osnovaniy dlya otkaza v ego soglasovanii, a takzhe trebovaniy k formatu v elektronnoy forme proekta lesovosstanovleniya». [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated December 29, 2021 No. 1024 "On approval of the Rules for reforestation, forms, composition, procedure for approval of a reforestation project, grounds for refusal of its approval, as well as requirements for the format in electronic form of a reforestation project"]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202110024
29. Ren F., Chen L., Li T., Li M. Spatial Changes of Suburban Forest Ecological Functions and Their Impact on Ecological Equity in the Process of Urbanization—A Case Study of Jiangning District, Nanjing, China. Forests. 2023;14(7):1308. DOI: https://doi.org/10.3390/f14071308

Сведения об авторах

Евдокимова Людмила Сергеевна – проректор, и.о. ректора, ФАУ ДПО «Институт повышения квалификации работников лесного хозяйства ул. Заводская, 1/1, пом. 2, Дивногорск, Российская Федерация, 663090, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ул. Академгородок, 50, Красноярск, Российская Федерация 660036, ORCID: http://orcid.org/0009-0003-3559-2050, e-mail: els@ipklh.ru

Татаринцев Андрей Иванович – доктор биологических наук, профессор кафедры лесоводства, охраны и защиты леса, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2969-8740, e-mail: lespat@mail.ru

✉ *Зленко Людмила Викторовна* – канд. с.-х. наук, доцент кафедры использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, ФАУ ДПО «Институт повышения квалификации работников лесного хозяйства ул. Заводская, 1/1, пом. 2, Дивногорск, Российская Федерация, 663090, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8857-8389, e-mail: zlenkolv@mail.ru

Полонская Любовь Александровна – доцент, начальник методического отдела ФАУ ДПО «Институт повышения квалификации работников лесного хозяйства ул. Заводская, 1/1, пом. 2, Дивногорск, Российская Федерация, 663090, ORCID: http://orcid.org/ 0009-0001-0551-6992, e-mail: polonskaya@ipklh.ru

Information about the authors

Liudmila S. Evdokimova – Vice-Rector, Acting Rector, Federal Autonomous Institution of Additional Professional Education "Institute for Advanced Training of Forestry Workers", 1/1 Zavodskaya str., room 2, Divnogorsk, Russian Federation, 663090, Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS” V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok St., 50, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660036, ORCID: http://orcid.org/0009-0003-3559-2050, e-mail: els@ipklh.ru

Andrey I. Tatarintsev – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Forestry, Protection and Protection of Forests, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsk Worker Newspaper Ave., Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2969-8740, e-mail: lespat@mail.ru

✉ *Liudmila V. Zlenko* – Cand. of Agr. Sci., Associate Professor of the Department of Use, Protection, Protection and Reproduction of Forests, Federal Autonomous Institution of Additional Professional Education "Institute for Advanced Training of Forestry Workers", 1/1 Zavodskaya str., room 2, Divnogorsk, Russian Federation, 663090, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8857-8389, e-mail: zlenkolv@mail.ru

Lyubov A. Polonskaya – Associate Professor, Head of the Methodological Department Federal Autonomous Institution of Additional Professional Education "Institute for Advanced Training of Forestry Workers", 1/1 Zavodskaya str., room 2, Divnogorsk, Russian Federation, 663090, ORCID: http://orcid.org/ 0009-0001-0551-6992, e-mail: polonskaya@ipklh.ru

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/5
УДК 630.232.5:630.165.5

Влияние типов кассет и контейнеров на биологическую продуктивность посадочного материала гибрида *Populus alba* L. x *Populus tremula* L.

Петр М. Евлаков[1], peter.evlakov@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-0138-2410
Алексей Н. Цепляев[1]✉, vsealexey@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1938-5660
Анна А. Попова[1], logachevaaa@rambler.ru https://orcid.org/0000-0003-0138-2410
Ольга С. Рязанцева[1], dnb-87@mail.ru https://orcid.org/0009-0000-5227-3420

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

В условиях сокращения лесных массивов в мире актуальным становится вопрос быстрого лесовосстановления, для чего необходимо подобрать ассортимент лесных древесных пород с улучшенными наследственными качествами, обладающими высокими темпами роста. Для получения качественных лесных насаждений в наиболее короткие сроки перспективным является использование посадочного материала с закрытой корневой системой, что позволяет повысить приживаемость растений до 100 % при посадке. Объектами исследования являлись экземпляры гибрида *Populus alba* L. x *Populus tremula* L., размноженные в условиях *in vitro* в лаборатории анализа ПЦР НИИ «Инновационных технологий и лесного комплекса» ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова. Исследования проводили в период с мая 2024 по ноябрь 2024 года на территории АО ПКВО: 394087, Воронежская область, г. Воронеж, ул. Учебный кордон, д. 5А. В ходе исследования определялась биологическая продуктивность растений, выращиваемых в разных видах контейнеров в теплице и на площадке закаливания. Биометрические измерения посадочного материала включали в себя: определение высоты, диаметра, сухой массы стебля и корня, количества листьев, длины корней исследуемых растений. В результате статистической обработки установлено, что наилучший результат по биометрическим показателям продемонстрировали растения, выращиваемые в контейнерах Hiko V-150 и Hiko V-265, наихудший в Hiko V-120, саженцы в контейнерах Р9 занимают промежуточное положение, но не обеспечивают рациональное использование площади. Для производства крупномерных саженцев гибрида *Populus alba* L. x *Populus tremula* L. с ЗКС в июне рекомендована в пересадка растений из кассет в технологические горшки 2 л. Саженцы данного вида эффективнее выращивать в теплице, однако следует учитывать, что такой посадочный материал лучше высаживать весной, поскольку растения не проходят фазы закаливания.

Ключевые слова: *гибрид Populus alba L. x Populus tremula L., клональное микроразмножение, in vitro, закрытая корневая система, теплица, площадка закаливания, посадочный материал, кассеты, контейнеры*

Финансирование: Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000020-6-4.1.2 «Отбор хозяйственно ценных и устойчивых к изменению климата древесных культур, отличающихся высокой биологической продуктивностью и потенциалом секвестрации углерода с учетом региональных почвенно-климатическим особенностей для реализации лесоклиматических проектов (FZUR-2023-0002)».

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние типов кассет и контейнеров на биологическую продуктивность посадочного материала гибрида *Populus alba* L. x *Populus tremula* L. / П.М. Евлаков, А.Н. Цепляев, А.А. Попова, О.С. Рязанцева // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 77-94. – *Библиогр.: с. 91-93 (20 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/5.

Поступила 01.08.2025. ***Пересмотрена*** 25.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

The influence of types of cassettes and containers on the biological productivity of the planting material of the hybrid *Populus alba* L. x *Populus tremula* L.

Peter M. Evlakov[1], peter.evlakov@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-0138-2410
Alexey N. Tseplyaev[1]✉, vsealexey@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1938-5660
Anna A. Popova[1], logachevaaa@rambler.ru https://orcid.org/0000-0003-0138-2410
Olga S. Ryazantseva[1], dnb-87@mail.ru https://orcid.org/0009-0000-5227-3420

[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

In the context of shrinking forests in the world, the issue of rapid reforestation is becoming relevant, for which it is necessary to select an assortment of forest tree species with improved hereditary qualities and high growth rates. To obtain high-quality forest plantings in the shortest possible time, it is promising to use planting material with a closed root system, which makes it possible to increase the survival rate of plants to 100% during planting. The objects of the study were specimens of the hybrid *Populus alba* L. x *Populus tremula* L., propagated under *in vitro* conditions in the laboratory of PCR analysis of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forest Complex at the G.F. Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies. The research was conducted in the period from May 2024 to November 2024 on the territory of Joint Stock Company Nursery Complex of the Voronezh Region: 5A Uchebny Kordon str., Voronezh, 394087, Voronezh Region. In the course of the study, the biological productivity of plants grown in different types of containers in the greenhouse and in the hardening area was determined. Biometric measurements of the planting material included: determination of height, diameter, dry weight of the stem and root, number of leaves, root length of the studied plants. As a result of statistical processing, it was found that plants grown in Hiko V-150 and Hiko V-265 containers showed the best result in biometric indicators, the worst in Hiko V-120, seedlings in P9 containers occupy an intermediate position, but do not provide rational use of the area. For the production of large-sized seedlings of the hybrid *Populus alba* L. x *Populus tremula* L. In June, it is recommended to transplant plants from cassettes into technological pots of 2 liters. Seedlings of this type are more efficient to grow in a greenhouse, however, it should be borne in mind that it is better to plant such planting material in the spring, since plants do not undergo hardening phases.

Keywords: *hybrid Populus alba L. x Populus tremula L., clonal micropropagation, in vitro, closed root system, greenhouse, hardening site, planting material, cassettes, containers*

Funding: The study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 1023013000020-6-4.1.2 "Selection of economically valuable and climate-resistant tree crops with high biological productivity and carbon sequestration potential, taking into account regional soil and climatic characteristics for the implementation of climatic projects (FZUR-2023-0002)"

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Evlakov.P.M., Tseplyaev A.N., Popova A.A., Ryazantseva O.S. (2025). The influence of types of cassettes and containers on the biological productivity of the planting material of the hybrid *Populus alba* L. x *Populus tremula* L. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 77-94 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/5.

Received 01.08./.2025. ***Revised*** 25/10/2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Интенсификация лесного хозяйства Российской Федерации и развитие плантационного лесоводства обусловливают необходимость повышения эффективности воспроизводства лесных ресурсов. Ключевым элементом решения этой задачи является научно обоснованный подбор древесных пород с улучшенными наследственными свойствами, такими как ускоренный рост, высокая продуктивность биомассы и значительный потенциал секвестрации углерода [1,2].

Ведущая роль в данном процессе отводится современной биотехнологии, интегрирующей методы молекулярной биологии, генной и клеточной инженерии. Широкое практическое применение нашел метод клонального микроразмножения *in vitro*, позволяющий тиражировать селекционные достижения путем массового производства генетически однородного посадочного материала [3]. Мировой опыт подтверждает, что основой интенсивного лесовосстановления является разработка технологий получения высококачественных саженцев, устойчивых к абиотическим и биотическим стрессорам. Эффективным решением является использование посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС), что, как демонстрирует практика скандинавских стран, обеспечивает высокую приживаемость и способствует созданию высокопродуктивных насаждений в сжатые сроки [4,5].

Внедрение интенсивной модели актуализирует разработку научно-обоснованных требований к посадочному материалу с ЗКС [6,7]. Одновременно с совершенствованием агротехник актуальной задачей остается селекция древесных пород. Перспективным направлением является создание гибридных форм тополей (*Populus* L.), сочетающих высокие темпы роста с устойчивостью к стрессам. Использование таких клонов позволяет существенно повысить продуктивность лесных плантаций [8].

Тополь (*Populus* L.) относится к числу наиболее быстрорастущих деревьев умеренных широт, имеющих значительное коммерческое значение [1]. Таксономически род представляет собой экологически пластичную группу двудомных растений, широко распространенную в Северном полушарии. Высокая адаптивность видов рода к различным почвенно-климатическим условиям обуславливает их ареал от бореальных до аридных зон [9].

Хозяйственная ценность тополя определяется исключительно высокими темпами роста и универсальными свойствами древесины. Мировой объем ее заготовки достигает приблизительно 20 млн м³ в год, что делает тополь ключевым ресурсом для целлюлозно-бумажной, деревообрабатывающей и биоэнергетической отраслей. Помимо производственной функции, тополевые насаждения выполняют важные средообразующие и экосистемные услуги, включая ремедиацию нарушенных земель, предотвращение эрозии почв и секвестрацию углерода [10].

Мировая площадь лесов с преобладанием тополя составляет около 59 млн га, из которых 31,4 млн га занимают целевые высокопродуктивные плантации. Распределение посадок по целям использования демонстрирует их многофункциональность: 61% предназначен для производства круглых лесоматериалов, 23% – для охраны окружающей среды, 9% – для получения топливной древесины и 7% – для иных целей [11]. Данная статистика подчеркивает стратегическую

роль рода *Populus* в модели интенсивного устойчивого лесного хозяйства, сочетающей экономическую эффективность с экологической стабильностью [12-14].

Анализ современных исследований подтверждает комплексное влияние параметров посадочных емкостей на развитие корневой системы и надземной части растений. Установлена прямая корреляция между объемом контейнера и ключевыми морфометрическими показателями саженцев. При этом критически важными являются не только объемные характеристики, но и конструктивные особенности емкостей, определяющие архитектонику корневой системы.

Экспериментальные данные демонстрируют видовую специфичность оптимальных объемов контейнеров. Например, исследования на австралийском кедре (*Toona ciliata*) выявили преимущества кассетных трубок объемом 288 см³ [15,16], в то время как для *Dipteryx alata* максимальные результаты были достигнуты в контейнерах объемом 820 см³ [17,18].

Конструктивные особенности емкостей оказывают существенное влияние на формирование корневой системы. Традиционные гладкостенные контейнеры часто провоцируют развитие структурных дефектов корней (спутывание, кольцевание). В отличие от них, контейнеры с системой воздушной подрезки способствуют формированию разветвленной мочковатой корневой системы без патологических деформаций, что значительно повышает приживаемость саженцев после высадки в открытый грунт [19].

Параметры микроклимата в рассадном комплексе также модулируют эффективность использования объема контейнера. Исследования показали, что применение контролируемого затенения позволяет создавать оптимальные условия для развития сеянцев, минимизируя транспирационный и световой стресс на критических стадиях органогенеза [20].

Таким образом, оптимизация параметров посадочных емкостей с учетом биологических особенностей целевых видов представляет собой необходимое условие для производства высококачественного посадочного материала. Перспективным направлением современных исследований является разработка специализированных контейнерных систем, обеспечивающих формирование оптимальной архитектоники корневой системы при различных технологических режимах выращивания. Комплексный подход, сочетающий оптимизацию параметров ЗКС с использованием генетически улучшенного посадочного материала, создает основу для устойчивого лесовосстановления и плантационного лесовыращивания в условиях интенсификации лесного хозяйства.

Целью данной работы является установление оптимальных характеристик размеров кассет и контейнеров и разработка технических требований для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой гибрида *Populus alba* L. x *Populus tremula* L., полученного методом клонального микроразмножения, для применения при реализации лесоклиматических проектов.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объектами исследования являлись экземпляры гибрида *Populus alba* L. x *Populus tremula* L., размноженные в условиях *in vitro* в лаборатории анализа ПЦР НИИ «Инновационных технологий и лесного комплекса» ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова.

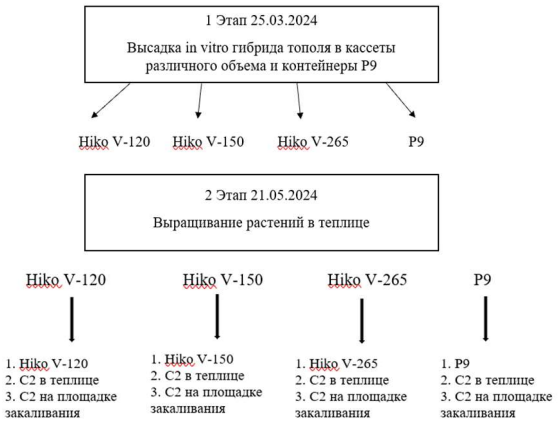


Рисунок 1. Схема опыта

Figure 1. The experiment's scheme

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

В ходе исследования определялась биологическая продуктивность растений, выращиваемых в разных видах кассет и контейнеров. Биометрические измерения посадочного материала включали в себя: определение высоты, диаметра, сухой массы стебля и корня, количества листьев, длины корней исследуемых растений.

Микрорастения гибрида тополя белого на осину *Populus alba* L. x *Populus tremula* L., полученные в культуре *in vitro*, на первом этапе были высажены в пластиковые кассеты с различным объёмом и густотой:

- Hiko V-120 SideSlit Д x Ш x В 352 x 216 x110 мм, 526 ячейки/м^2, в кассете – 40 шт., объем ячейки - 120 см^3,
- Hiko V-150 Д x Ш x В 352 x 216 x 100 мм; 316 ячейки/м^2, в кассете – 24 шт., объем ячейки -150 см^3,
- Hiko V-265 Д x Ш x В 352 x 216 x150 мм, 368 ячеек/м^2, в кассете – 28 шт., объем ячейки - 265 см^3,
- контейнеры Р9 Д x Ш x В 90 x 90 x 100 мм, 100 шт./м^2, объем 500 см^3.

На первом этапе растения в данных контейнерах выращивались в теплице. На втором этапе из кассет и контейнеров часть растений пересадили в контейнеры объемом 2 л (С2). Далее эти переконтейнерованные саженцы разделили на две партии, одну из которых оставили в теплице, а другую перенесли на площадку закаливания. Партию, оставленную в кассетах, доращивали в условиях теплицы.

На рисунке 1 приведено схематическое описание вариантов опыта.

Закладку экспериментов, сбор материалов полевых исследований и апробирование комплекса агротехнических мероприятий выращивания посадочного материала с закрытой корневой, камеральную обработку полевых данных проводили в период с мая 2024 по ноябрь 2024 года на территории АО ПКВО: 394087, Воронежская область, город Воронеж, улица Учебный кордон, дом 5А.

При планировании и постановке опытов следовали общеметодологическим рекомендациям [1]. У растений, выращиваемых в контейнерах, линейкой измерялись: высота от начала прироста диаметр стволика измерялся штангенциркулем у основания прироста. Сырая и сухая масса листьев, побегов и корней определялась после сушки в сушильном шкафу Binder (Германия) до абсолютно сухого состояния путем взвешивания на электронных лабораторных электронных весах Ohaus (США). Определение массы сырых и сухих корней проводилось взвешиванием с точностью до 0,01 г.

Для установления влияния отдельных факторов на основные биометрические показатели растений были выполнены: однофакторный дисперсионный и корреляционно-регрессионный анализы. Для определения существенности различий средних рассчитывали критерий Фишера (F).

Статистическая обработка результатов замеров побегов проводилась с использованием специальных программ: Excel 2015, Statistica 10.0, Stadia 8.2 с установлением средней величины, ошибки, точности и достоверности опыта.

Результаты

Наблюдения за ростом и развитием саженцев гибридного тополя белого на осину *Populus alba* L. x *Populus tremula* L. (далее гибрид тополя) на начальном этапе (май 2024 г.) выращивания и статистическая обработка данных биометрических показателей, позволили получить ряд значимых результатов (таблица 1).

На данном этапе онтогенеза наибольшая высота растений гибрида тополя зафиксирована в кассетах Hiko V-265 (14,7±0,9 см) с самой большой высотой ячейки -150 мм, на втором месте - растения в Hiko V-120 и контейнере Р9 (высота ячейки 100 мм), которые продемонстрировали близкую высоту -12,5 см и 12,8 см соответственно. Вариант в кассете Hiko V-150 (10,1±0,7 см) уступает по средней высоте, в данном варианте были зафиксированы самые низкие по сравнению с другими максимальные и минимальные значения (7,6-14,4 см). Уровень изменчивости во всех вариантах достаточно высокий (C_v=14,5-23,3 %), что вероятно связано с постпересадочным стрессом и индивидуальными процессами адаптации растений.

В рамках эксперимента было проведено сравнение высоты саженцев между собой с использованием дисперсионного анализа, который продемонстрировал достоверные отличия (P>0,05) по высоте у всех вариантов опыта, кроме 1 и 4.

Таблица 1

Биометрические показатели контейнеризированных саженцев гибрида тополя на начальном этапе

Table 1

Biometric indicators of containerized poplar hybrid seedlings at the initial stage

Варианты опытов | Experimental options	Высота, см | Height, cm		Диаметр корневой шейки, мм | Diameter of the root neck, mm		Количество листьев, шт. | Number of leaves, pcs.		Сухой вес надземной части, г | Dry weight of the aboveground part, g		Сухой вес корней, г | Dry weight of roots, g	
	M±$m_м$	Cv, %	M±$m_м$	Cv, %	M±$m_м$	Cv, %	M±$m_м$	Cv, %	M±$m_м$	Cv, %
Hiko V-120	12,5±1,2	14,5	1,8±0,33	23,0	8±0,8	31,3	0,21±0,03	33	0,07±0,01	42
Hiko V-150	10,1±0,7	21,3	1,6±0,11	23,2	7,7±0,1	24,5	0,16±0,03	50	0,06±0,01	50
Hiko V-265	14,7±0,9	19,7	1,9±0,19	32,9	8,8±0,4	13,8	0,25±0,05	60	0,2±0,08	40
P9	12,8±0,7	23,5	1,8±0,13	22,8	10,5±0,5	16,2	0,35±0,04	40	0,14±0,02	42

Примечание: M – Среднее; $m_м$ – Ошибка среднего; Cv – коэффициент вариации

Note: M – Medium; $m_м$ – Medium error; Cv – Coefficient of variation

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Средние показатели диаметра у исследуемых растений продемонстрировали аналогичную тенденцию, что и в случае с высотой. Максимальные значения были у саженцев в Hiko V-265, (1,9±0,19 мм), минимальные в Hiko V-150 (1,6±0,11 мм) и одинаковые в остальных двух вариантах (1,6±0,11 мм). Однако, различия достоверны лишь в случае с Hiko V-150 и P9. Вариация средних значений по данному признаку также высокая (C=22,8-32, 9).

При анализе среднего количества листьев, максимальное количество зафиксировано в P9 (10,5±0,5 шт), где самая низкая густота (100 шт /м^2), минимальное установлено в Hiko V-150 -7,7±0,11 шт (316 шт/ м^2), промежуточное же положение занимают варианты в Hiko V-120 (8±0,8 шт) (526 шт/м^2) и Hiko V-265 (8,8±0,4 шт) (368 шт/ м^2), что не подтверждает прямую зависимость количества листьев от густоты размещения растений.

Расчет дисперсий и сравнение по Фишеру подтвердило наличие достоверных различий между средними значениями количества листьев в варианте P9 и другими вариациями. Достоверные отличия зафиксированы между вариантами Hiko V-265 и Hiko V-150. В остальных комбинациях достоверных отличий нет.

Определение сухой массы надземной части и корней на данном этапе роста саженцев является очень важным и зачастую более точным способом определения общей продуктивности растения. Самые высокие результаты по данному показателю продемонстрировали варианты: в контейнере P9 0,35±0,04 г/0,14±0,02 г (сухая масса надземной/сухая масса корней) и в кассетах с наибольшим объемом ячейки - Hiko V-265 - 0,25±0,05 г/0,2±0,08 г, самая низкая продуктивность выявлена в варианте Hiko V-150 0,16±0,03/0,07±0,01 г.

На диаграмме (рисунок 2) приведено соотношение сухой надземной массы и сухой массы корней.

В вариантах Hiko V-120, Hiko V-150 и P9 продемонстрирована близкая тенденция – масса надземной части практически в 3 раза выше, чем сухая масса корней. Это связано в первую очередь с особенностями роста и развития саженцев на данном этапе онтогенеза, когда в первую очередь идет формирование фотосинтетического аппарата. В варианте с наибольшей средней высотой саженца Hiko V-265 данные параметры наиболее сбалансированы (55 % к 45%).

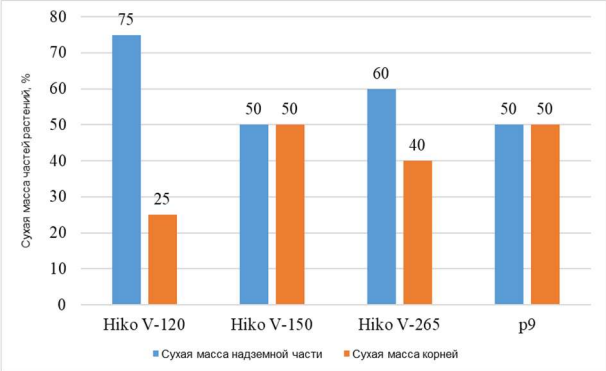


Рисунок 2. Процентное соотношение сухой массы надземной и подземной частей

Figure 2. Percentage of the dry mass of the aboveground and underground parts

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На диаграмме (рисунок 3) приведено соотношение сухой надземной массы (стебля и листьев) и сухой массы корней относительно сухой массы всего растения. В Hiko V-120 сухая масса надземной части и корней соответственно составила 60 %/50 % от самого продуктивного варианта (P9). Различия в случае с надземной частью достоверны в большинстве сравниваемых парах, кроме Hiko V-120 и Hiko V-265, что подтверждает сходство вариантов по указанным признакам.

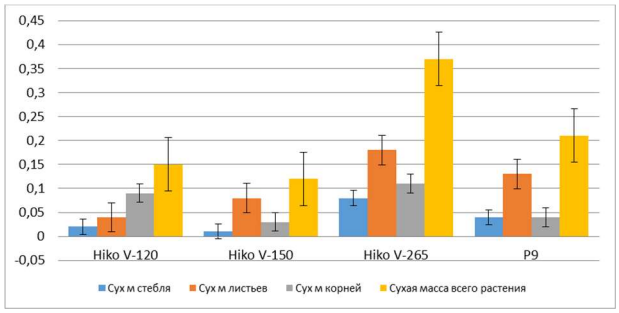


Рисунок 3. Соотношение сухой массы надземной части и сухой массы корней к массе всего растения

Figure 3. The ratio of the dry mass of the aboveground part and the dry mass of the roots to the mass of the entire plant

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Расчет коэффициентов корреляции между важнейшими характеристиками растений в различных вариантах опыта на начальном этапе развития контейнеризированного посадочного материала продемонстрировал неоднозначную картину.

В варианте Hiko V-120 с самым маленьким объемом ячейки и наибольшей густотой наиболее тесная связь установлена между сухой массой корней и надземной частью (r=0,84), высотой и сухой массой надземной части (r=0,74), а также высотой и сухой массой корней (r=0,73). Между высотой и диаметром корреляция низкая (r=0,3). Связи между остальными показателями невысокие. В варианте с Hiko V-150 повышенная корреляция отмечена между высотой и диаметром (r=0,6), остальные характеристики демонстрируют минимальную связь между собой, что косвенно может свидетельствовать о не совсем нормальном развитии посадочного материала в данном варианте опыта. В высокопродуктивном варианте Hiko V-265 картина более четкая. Высокая корреляционная связь отмечена между высотой и диаметром (r=0,9), диаметром и сухой массой корней (r=0,8) высотой и сухой массой корней (r=0,7). Средний уровень корреляции установлен между сухой массой корней и количеством листьев, что характеризует работу листового аппарата и его активное участие в накопления биомассы. В варианте P9 высоких уровней связи не установлено, высота средне

коррелирует с сухой массой корней (r=0,6), что требует дальнейших наблюдений в динамике.

Сила влияния фактора «Кассета и контейнер» на рост саженцев в высоту составляет 35 % от всех факторов, воздействующих на растение (η^2=0,35). Влияние данного фактора на рост по диаметру незначителен – 7 % (η^2=0,07). На накопление сухой массы надземной части и сухой массы корней сила влияние указанного фактора составляет 29 % и 17 % соответственно. Количество листьев у саженцев зависит на 27 % от описываемого фактора.

Таким образом, на данном этапе опыта лучшие результаты по росту в высоту и по диаметру продемонстрировали растения гибрида Т. белый х осина в кассетах Hiko V-265. В варианте Р9 зафиксирована наибольшая биологическая продуктивность растений, но экономически эффект использования данного контейнера в условиях теплицы снижается из-за низкого выхода продукции с единицы площади (100 шт/1 м^2).

Самые низкие показатели по высоте, диаметру и сухому весу всего растения зафиксированы в кассетах Hiko V-150. Данную тенденцию целесообразно отследить в динамике.

На начальном этапе выращивания контейнеризированного посадочного материала гибрида тополя хорошо развиваются варианты Hiko V-120 и Hiko V-265, которые демонстрируют не только нормальный рост и развитие растений, но и значительную густоту растений на 1 м^2 теплицы, что очень важно при промышленном выращивании.

На следующем этапе анализа были определены основные биометрические параметры в период активного роста саженцев гибрида тополя (июль 2024 г.). Обработка полученных данных методами вариационной статистики позволила получить следующие результаты (таблица 2). Сравнение средних значений основных биометрических параметров показывает, что на этапе активного роста саженцев гибрида тополя высота растет с увеличением объема корнезакрывающего кома и после пересадки интенсивность роста увеличивается в 2,7 раза для самого низкопродуктивного варианта Hiko V-120 и находится в диапазоне 1,43 -1,48 раза для остальных вариантов опыта для выращиваемых далее в теплице. Пересаженные в двухлитровые контейнеры и перенесенные на площадку закаливания растения продемонстрировали еще большую интенсивность роста. Растения в варианте Hiko V-120 пересаженные в контейнер 2 л опережал аналогичный без пересадки в 3,3 раза, а остальные варианты опыта доминировали над аналогичными без пересадки на 1,6 -1,9 раза. Прирост по диаметру продемонстрировал схожую тенденцию. Наибольшую скорость роста показали экземпляры на площадке закаливания.

Расчет коэффициентов корреляции между важнейшими характеристиками растений в различных вариантах опыта на данном этапе развития контейнеризированного посадочного материала продемонстрировал, что в варианте Hiko V-120 наиболее тесная связь установлена между диаметром и количеством листьев (r=0,9), высотой и диаметром (r=0,85), связи между остальными показателями невысокие. В варианте с Hiko V-150 высокая корреляция отмечена между высотой и количеством листьев (r=0,94), высотой и сухой массой надземной части (r=0,95), высотой и сухой массой корней (r=0,93). В варианте Hiko V-265 наблюдается высокая корреляционная связь отмечена между высотой и диаметром (r=0,93), диаметром и сухой массой корней (r=0,94) высотой и сухой массой корней (r=0,95). В варианте Р9 наиболее высокая связь между сухой массой корней и высотой (r=0,92), диаметром (r=0,9) и количеством листьев (r=0,9).

На рисунке 4 изображены диаграммы, показывающие соотношение сухой надземной массы и сухой массы корней относительно сухой массы всего растения гибрида тополя в период активного роста для каждого варианта опыта.

Расчет силы показателя сила влияния «технология» на высоту при сравнении всех трех вариантов доращивания показал, что пересадка в большие контейнеры оказывает влияние: для Hiko V-120 = 85 % (η^2=0,85); Hiko V-150 = 58 % (η^2=0,58); Hiko V-265 = 54 % (η^2=0,54); Р9= 73 % (η^2=0,73). При этом сравнение средних показателей высоты у

вариантов, пересаженных в двухлитровые контейнеры, но выращиваемые в теплице и на площадке закаливания показало незначительное влияние фактора «Условия доращивания теплица-открытая площадка» для Hiko V-120 = 33 % (η2=0,33); Hiko V-150 = 6 % (η2=0,06); Hiko V-265 = 1 % (η2=0,01); P9= 63 % (η2=0,63). Как показывает сравнительный анализ, высокопродуктивные варианты Hiko V-150 и Hiko V-265 после пересадки практически не отличаются по интенсивности прироста в высоту.

Биометрические параметры микрорегенерантов гибрида тополя в конце первого вегетационного периода (октябрь 2024 г.) отражены в таблице 3.

Высота посадочного материала гибрида тополя, не пересаженного в контейнер С2, соответственно, составляет от 40,1 см (Hiko V-120) до 91,0 см (P9), а диаметр от 3,4 до 6,7 мм. Показатели сухой массы саженцев также закономерно увеличиваются. Таким образом, минимальные результаты зафиксированы в Hiko V-120, максимальные – у контейнера P9, значения показателей Hiko V-150 и Hiko V-265 близки друг к другу. Нужно отметить, что отношение массы стебля к массе корня остается ниже или около 3 единиц, что является хорошим показателям качества посадочного материала. Возможно, только вариант выращивания растений в контейнерах Hiko V-120 526 шт./м2 не может быть рекомендован для промышленного использования, т.к. в этом случае наблюдается сильное развитие надземной части растений над развитием их корневой системы.

Таблица 2

Биометрические показатели контейнеризированных саженцев гибрида тополя в период активного роста

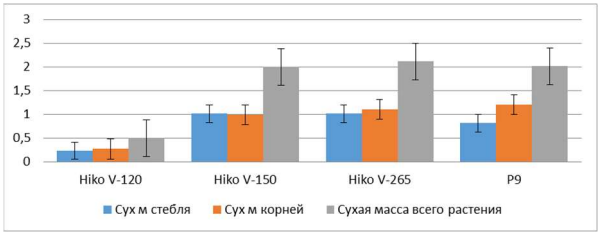
Table 2

Biometric indicators of containerized poplar hybrid seedlings during the period of active growth

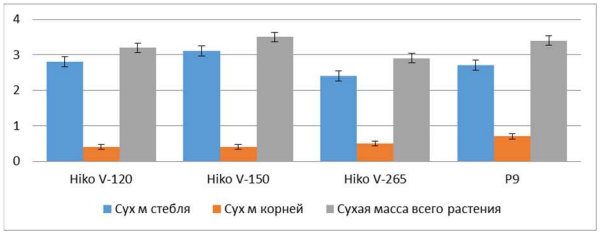
Варианты опытов | Experimental options	Высота, см | Height, cm		Диаметр корневой шейки, мм | Diameter of the root neck, mm		Количество листьев, шт. | Number of leaves, pcs.		Сухой вес надземной части, г | Dry weight of the aboveground part, g		Сухой вес корней, г | Dry weight of roots, g	
	M±mм	Cv, %	M±mм	Cv, %	M±mм	Cv, %	M±$m_м$	Cv, %	M±$m_м$	Cv, %
Гибрид тополь белый х осина (не пересаженные в 2 литра, в теплице) | Hybrid white poplar aspen (not transplanted in 2 liters, in a greenhouse)										
Hiko V-120	14,1±1,4	30	1,6±0,1	25	8,3±0,7	28	0,2±0,04	57	0,06±0,01	67
Hiko V-150	23,4±1,4	9	2,7±0,1	13	12,4±0,5	12	1,2±0,13	34	0,18±0,03	50
Hiko V-265	28,2±1,0	12	3,3±0,08	7	11,7±0,4	11	1,04±0,06	19	0,34±0,03	24
P9	28,6±1,0	30	3,2±0,2	22	12,9±0,6	14	1,2±0,23	61	0,36±0,07	58
Гибрид тополь белый х осина (пересаженные в 2 литра, в теплице) | Hybrid white poplar aspen (transplanted in 2 liters, in a greenhouse)										

Hiko V-120	37,4±1,9	16	2,4±0,03	21	15,6±0,9	18	2,08±0,3	45	0,4±0,07	58
Hiko V-150	34,1±1,9	17	3,8±0,17	14	15,8±0,8	16	3,1±0,3	33	0,4±0,05	44
Hiko V-265	42,0±2,7	20	3,8±0,27	22	18±0,8	14	2,4±0,37	49	0,5±0,1	60
P9	40,1±1,9	15	4,6±0,23	16	18±0,7	12	2,7±0,28	34	0,7±0,09	39
Гибрид тополь белый х осина (пересаженные в 2 литра, на площадке закаливания) | Hybrid white poplar aspen (transplanted in 2 liters, on the hardening site)										
Hiko V-120	46,8±2,5	17	5,5±0,22	13	18,6±1,1	18	4,2±0,4	30	1,1±0,1	29
Hiko V-150	37,2±2,1	18	4,8±0,18	12	17,6±0,9	16	2,6±0,3	37	0,6±0,08	43
Hiko V-265	43,8±2,4	17	5,2±0,3	20	18,3±0,6	10	3,2±0,4	41	1,2±0,18	49
P9	54,4±1,8	10	5,6±0,2	11	20,7±0,9	15	4,5±0,4	26	1,3±0,15	36

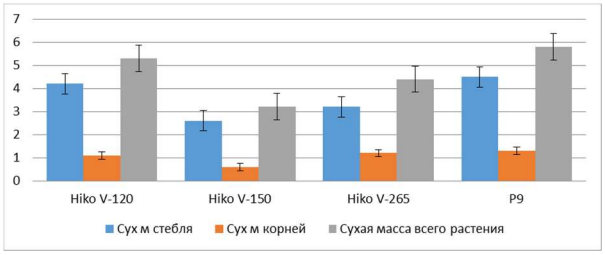
Примечание: M – Среднее; $m_м$ – Ошибка среднего; Cv – коэффициент вариации
Note: M – Medium; $m_м$ – Medium error; Cv – Coefficient of variation
Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations



а



б



в

Рисунок 4. Соотношение сухой надземной массы и сухой массы корней относительно сухой массы всего растения гибрида тополя в период активного роста: а- кассеты без пересадки; б – пересаженные в 2 л и доращиваемые в теплице; в – пересаженные в 2 л и доращиваемые на площадке закаливания
Figure 4. The ratio of the dry aboveground mass and the dry mass of the roots relative to the dry mass of the entire poplar hybrid plant during active growth : a - cassettes without transplantation; b – transplanted in 2 liters and grown in a greenhouse; c – transplanted in 2 liters and grown on a hardening site
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таблица 3

Биометрические показатели контейнеризированных саженцев гибрида тополя в конце первого вегетационного периода

Table 3

Biometric indicators of containerized poplar hybrid seedlings at the end of the first growing season

Варианты опытов | Experimental options	Высота, см | Height, cm	Диаметр корневой шейки, мм | Diameter of the root neck, mm	Сухой вес надземной части, г | Dry weight of the aboveground part, g	Сухой вес корней, г | Dry weight of roots, g	Масса всего растения, г |Weight of the whole plant, g	Отношение стебля к массе корня |The ratio of the stem to the mass of the root
Гибрид тополь белый х осина (не пересаженные в 2 литра, в теплице) | Hybrid white poplar aspen (not transplanted in 2 liters, in a greenhouse)						
Hiko V-120 526 шт./м^2	40,1±3,68	3,4±0,25	2,1±0,41	0,6±0,13	2,7±0,30	3,5±0,2
Hiko V-150 316 шт./м^2	70,3±3,78	4,8±0,28	5,0±0,62	1,7±0,24	6,7±0,49	2,9±0,34
Hiko V-265 368 шт./м^2	77,2±3,24	5,2±0,17	5,6±0,41	2,1±0,20	7,7±0,44	2,7±0,13
P9, V-500 см^3 100 шт./м^2	91,0±3,87	6,7±0,35	9,4±1,19	3,6±0,45	13,0±0,97	2,6±0,2
Гибрид тополь белый х осина (пересаженные в 2 литра, в теплице) | Hybrid white poplar aspen (transplanted in 2 liters, in a greenhouse)						
Hiko V-120 526 шт./м^2	151,6±4.49	10,0±0,35	27,8±2,72	10,2±1,37	38,0±3,18	2,7±0,33
Hiko V-150 316 шт./м^2	160,1±3,25	10,8±0,5	30,1±2,30	10,4±1,11	40,5±2,18	2,9±0,30
Hiko V-265 368 шт./м^2	165,5±3,97	11,2±0,37	32,8±2,37	12,4±1,49	45,2±2,87	2,6±0,21
P9, V-500 см^3 100 шт./м^2	176,4±3.38	11,8±0,46	37,7±2,16	14,0±1,27	51,7±2,37	2,7±0,15
Гибрид тополь белый х осина (пересаженные в 2 литра, на площадке закаливания) | Hybrid white poplar aspen (transplanted in 2 liters, on the hardening site)						
Hiko V-120 526 шт./м^2	116.1±3.32	10.7±0.46	19.8±1.43	16.8±1.84	36.6±2.79	1.2±0.08
Hiko V-150 316 шт./м^2	109,0±4,17	10,9±0,4	23,5±2,07	21±1,89	44,5±2,89	1,1±0,08
Hiko V-265 368 шт./м^2	92,3±3,67	9,2±0,29	14,5±1,67	11,9±1,82	26,4±2,79	1,2±0,11
P9, V-500 см^3 100 шт./м^2	97,8±3.43	9,3±0.24	19,5±1.33	12,4±1.11	31,9±1,68	1,6±0,1

Примечание: M – Среднее; $m_м$ – Ошибка среднего; Cv – коэффициент вариации

Note: M – Medium; $m_м$ – Medium error; Cv – Coefficient of variation

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Доращивание гибрида тополя в двухлитровых контейнерах в теплице приводит к значительному увеличению как биометрических параметров посадочного материала (высота и диаметр у корневой шейки), так и характеристик их массы, причем соотношение массы надземной части к массе корней не превышает величины 3,0, что может служить благоприятной предпосылкой для успешного роста такого посадочного материала в лесных культурах. Максимальные результаты у данной группы зафиксированы в контейнерах Р9, минимальные – у Hiko V-120.

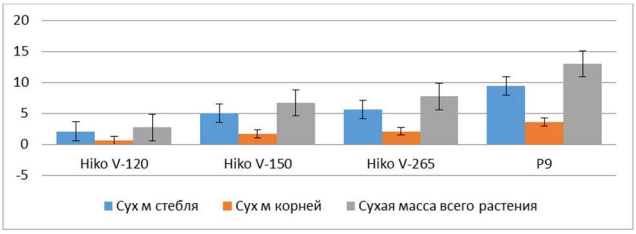
Расчет коэффициентов корреляции между характеристиками растений в различных вариантах опыта на данном этапе развития посадочного материала с ЗКС продемонстрировал следующие зависимости.

В варианте Hiko V-120 высокий уровень связи установлен у сухой массы надземной части и корней (r=0,95). Остальные зависимости слабые, что говорит о нарушении естественного хода ростовых процессов в сторону ингибирования. Другая картина продемонстрирована у растений в варианте с Hiko V-150. Высокая корреляция отмечена между высотой и сухой массой корней (r=0,9), диаметром (r=0,88), сухой массой надземной части (r=0,85) и корней, повышенная (r=0,8).

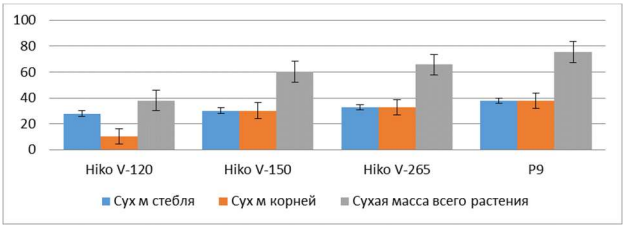
В высокопродуктивном варианте Hiko V-265 корреляционные связи еще более убедительны. Так высокий уровень связи отмечен, между высотой и диаметром (r=0,95), высотой и сухой массой корней (r=0,96), высотой и сухой массой надземной части (r=0,92), сухой массой корней (r=0,9) и сухой массой надземной части. Диаметр достоверно коррелирует с сухой массой надземной части (r=0,85) и сухой массой корней (r=0,9), что свидетельствует о гармоничном развитии посадочного материала, и соответственно о комфортных условиях, которые при прочих равных условиях обеспечиваются объемом корнезакрывающего кома.

Доращивание на открытом полигоне гибрида тополя после пересадки в двухлитровые контейнеры значительно больше снижает высоту, выращиваемых растений, относительно экземпляров, выращиваемых в теплице, при этом разница в диаметре корневой шейки – не значительная. Также следует отметить тенденцию увеличения массы корнеобитаемой зоны и снижению массы надземной части у экземпляров на площадке закаливания относительно пересаженных экземпляров в теплице. В данном случае отношение массы надземной части к массе корней в пределах 1,1-1,6, что будет способствовать высокой приживаемости и высокой скорости роста после посадки в лесные культуры.

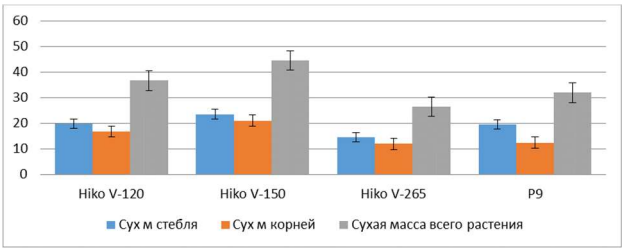
На рисунке 5 показано соотношение сухой надземной массы и сухой массы корней относительно сухой массы всего растения гибрида тополя в конце первого вегетационного периода.



а



б



в

Рисунок 5. Соотношение сухой надземной массы и сухой массы корней относительно сухой массы всего растения гибрида тополя в конце первого вегетационного периода а- кассеты без пересадки; б – пересаженные в 2 л и доращиваемые в теплице; в – пересаженные в 2 л и доращиваемые на площадке закаливания

Figure 5. The ratio of the dry aboveground mass and the dry mass of the roots relative to the dry mass of the entire poplar hybrid plant at the end of the first vegetative period is a - cassettes without transplantation; b – transplanted in 2 liters and grown in a greenhouse; c – transplanted in 2 liters and grown on a hardening area

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таким образом, по итогам оценки показателей в конце первого вегетационного периода наилучшие показатели продемонстрировали варианты, пересаженные в горшки 2 л и доращиваемые в теплице. Растения гибрида тополя, которые были пересажены и доращивались на площадке закаливания несколько отставали в росте от выращиваемых в теплице также в двухлитровых горшках.

Обсуждение

Данные, полученные в ходе исследования, могут быть использованы в формировании базы для разработки технических требований, необходимых для повышения качества и стандартизации посадочного материала. Анализ требований правил лесовосстановления к посадочному материалу применительно к быстрорастущим древесным культурам близким по биологическим особенностям с закрытой корневой системой, полученных методом клонального микроразмножения *in vitro* в условиях теплиц, показывает, что применительно к Лесостепному району европейской части РФ и Району степей европейской части РФ существуют критерии и требования, которые будут служить базовым сценарием для сравнения результатов исследования и разработки технических требований для посадочного материала гибрида тополя полученного методом клонального микроразмножения in vitro в условиях теплиц.

По итогам анализа нормативных документов и справочных материалов выявлены противоречия в требованиях к посадочному материалу с закрытой корневой системой, а для древесных культур, участвующих в нашем исследовании посадочный материал, которых выращен по технологии in vitro, особенно в аспектах возраста, размеров и условий применения продемонстрировал полное отсутствие технических требований. Существующие стандарты недостаточно учитывают особенности выращивания в закрытом грунте и потенциал технологий клонального микроразмножения для быстрорастущих пород. Для повышения эффективности лесовосстановления и создания плантаций необходимо уточнить и унифицировать требования к такому посадочному материалу. Анализ стандартов, действующих в настоящий момент в РФ и сравнение с ними полученных нами данных показывает, что применение технологии производства посадочного материала с использованием метода in vitro в условиях теплиц позволяет в случае с саженцами гибрида Т. белый х осина получить высококондиционные саженцы с ЗКС существенно превышающие нормативные значения. Полученные результаты по биометрическим показателям посадочного материала гибрида Populus alba L. × Populus tremula L. согласуются с данными ряда других исследований, включающих изучение влияния типа и объёма контейнеров на рост и развитие саженцев тополя.

Так, в исследовании Evlakov, P.; Tseplyaev, A.; Popova, A и др [9], проведённом в условиях Центрального Черноземья, показано, что высота саженцев двух генотипов тополя при выращивании с закрытой корневой системой варьировала в пределах 70,6 ± 5,5 – 111,5 ± 5,0 см при использовании контейнеров объёмом от 1 до 3 л. Аналогичный диапазон (92–110 см) был получен в нашем исследовании, что подтверждает сопоставимость данных и подчёркивает важность оптимального выбора объёма корнеобитаемой зоны.

Результаты данной работы также согласуются с выводами Stener L.-G., Westin J. (2017), которые отмечали, что гибридные формы тополя и осины отличаются более высокими темпами роста и лучшей приживаемостью по сравнению с исходными видами при условии соответствия технологии выращивания экологическим особенностям региона [10]. Исходя из этого, можно говорить о целесообразности

использования гибридов Populus alba × P. tremula для плантационного лесовыращивания в условиях Центральной лесостепи.

Также, результаты проведенного нами эксперимента частично подтверждаются исследованиями Ziauka J, Kuusienė S. [11], показавшими высокую регенерационную способность побегов гибрида Populus alba × P. tremula при клональном микроразмножении in vitro на безгормональной среде. Данные результаты могут быть свидетельством значительного биотехнологического потенциала гибрида, что делает его перспективным объектом для ускоренного производства посадочного материала с ЗКС.

При этом следует отметить, что в имеющейся литературе отсутствуют данные по исследованиям выращивания гибрида Populus alba L. × Populus tremula L. С ЗКС в типах контейнеров Hiko V-120, V-150, V-265 и P9. В этой связи, полученные нами результаты расширяют имеющиеся представления о влиянии особенностей кассет и контейнеров на морфометрические параметры посадочного материала, что имеет практическое значение для оптимизации технологии производства посадочного материала в условиях контролируемого микроклимата.

Для выращивания кондиционного посадочного материала гибрида тополя можно рекомендовать все типы кассет и контейнер P9. Учитывая плотность размещения, а соответственно выход единицы продукции с квадратного метра следует рекомендовать кассеты Hiko V-150 и Hiko V-265. Пересадка в двухлитровые горшки позволяет существенно повысить основные биометрические параметры растений. Так, самые высокие показатели продемонстрировали варианты, пересаженные в горшки 2 л и доращиваемые в теплице даже в случае с невысокопродуктивным Hiko V-120 саженцы почти в 4-10 раз превышали стандарт, остальные варианты продемонстрировали еще большие результаты (Hiko V-150+433 %- +967 %; Hiko V-265+450 %- +1001 %). Растения гибрида Т. белый х осина, которые были перенесены и доращивались на площадке закаливания несколько отставали в росте от выращиваемых в теплице также в двухлитровых горшках. Однако, морфометрические показатели так же значительно превышали стандартные значения (Hiko V-120 = +287 -+674; Hiko V-150 = +263 - +627; Hiko V-+207 %- +515 5 P9 = +226 % - +552 %).

На основании полученных в результате исследований данных предлагаются следующие параметры к размерам надземной части контейнеризированных саженцев гибрида тополя, полученных методом *in vitro* и выращенных в течение 1 года в теплице и на площадке закаливания с пересадкой в двухлитровые контейнеры, для лесостепной зоны Европейской части России:

- Для лесовосстановления (без пересадки в контейнер) - Толщина стволика у корневой шейки не менее 4-5 мм, Высота, не менее 60-70 см.

- Для целевых плантаций и доращивания в питомнике на крупномеры (с пересадкой в контейнер) для осенней посадки того же года - Толщина стволика у корневой шейки не менее 8-9 мм, Высота, не менее 90-110 см.

- Для целевых плантаций и доращивания в питомнике на крупномеры (с пересадкой в контейнер и доращиванием в теплице) для посадки весной следующего года - Толщина стволика у корневой шейки не менее 10-11мм, Высота, не менее 150-160 см.

Необходимо отметить, что указанные параметры посадочного материала необходимо уточнить после пересадки и доращивания в условиях лесокультурных площадей и школ питомников.

Выводы

основании проведенного исследования разработана научно обоснованная технология выращивания посадочного материала гибрида тополя белого на осину (Populus alba L. × Populus tremula L.), полученного методом клонального микроразмножения in vitro. Доказано, что оптимальным решением для начального этапа производства являются кассеты Hiko V-265 объемом 265 см³, обеспечивающие сбалансированное развитие растений при высокой плотности размещения.

Ключевым элементом технологии признана обязательная пересадка саженцев в двухлитровые контейнеры, позволяющая в 1,6-3,3 раза увеличить основные биометрические показатели. Наибольшая эффективность достигнута при доращивании в тепличных условиях, где растения демонстрировали максимальные ростовые характеристики - высоту до 176 см и диаметр корневой шейки до 11,8 мм.

Установлено, что доращивание на площадке закаливания формирует более гармоничное соотношение надземной и подземной биомассы (1,1-1,6), что является важным прогностическим признаком успешной приживаемости при последующей высадке на лесокультурные площади.

Разработаны дифференцированные технические требования к посадочному материалу для различных целей использования. Для лесовосстановления рекомендованы саженцы высотой не менее 60-70 см с диаметром корневой шейки 4-5 мм, для плантационного лесовыращивания - 90-110 см и 8-9 мм соответственно, а для получения крупномерного посадочного материала - 150-160 см при диаметре 10-11 мм.

Полученные результаты восполняют существующий нормативный пробел в области стандартизации посадочного материала, произведенного с использованием биотехнологических методов, и создают основу для разработки эффективных технологий интенсивного лесовосстановления и плантационного лесовыращивания в условиях лесостепной зоны Европейской части России.

Список литературы

1. Романов Е.М. Воспроизводство лесов в новой стратегии перехода к устойчивому развитию лесного сектора России // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2021. – № 1(49). – С. 5-22. – DOI: 10.25686/2306-2827.2021.1.5.
2. Савченкова В.А., Васильев С.Б., Никитин В.Ф., Аксенов П.А. Продуктивность лесных плантационных насаждений // Известия вузов. Лесной журнал. – 2021. – № 1. – С. 35-45. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-35-45.
3. Самарская В.О., Малаева Е.В., Постнова М.В. Аспекты клонального микроразмножения и сохранения растений in vitro // Природные системы и ресурсы. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 13-22. – DOI: 10.15688/nsr.jvolsu.2019.3.2.
4. Nawaz M., Sun J., Shabbir S., Khattak W.A., Ren G., Nie X., Bo Y., Javed Q., Du D., Sonne C. A review of plants strategies to resist biotic and abiotic environmental stressors // Science of The Total Environment. – 2023. – Vol. 900. – P. 165832. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165832.
5. Kakimzhanova A.A., Zhagipar F.S., Naziran F. Optimization of microclonal propagation conditions for increasing the multiplication factor of poplar microshoots // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Биологические науки. – 2019. – № 1(126). – P. 57-65. – DOI: 10.32523/2616-7034-2019-126-1-57-65.
6. Бобушкина С.В., Сеньков А.О., Файзулин Д.Х. Практика выращивания лесного посадочного материала с закрытой корневой системой применительно к тепличным комплексам Архангельской области // Вопросы лесной науки. – 2020. – Т. 3, № 4. – С. 1-16. – DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16.
7. Михайлов К.Л., Демина Н.А. Экономическое обоснование и прогноз инвестирования в выращивание посадочного материала хвойных пород деревьев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2024. – № 2(42). – С. 64-68.
8. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Каганов В.В. Экосистемные услуги и пространственное распределение защитных лесов Российской Федерации // Лесоведение. – 2021. – № 6. – С. 581-592. – DOI: 10.31857/S0024114821060115.
9. Авдеева Е.В., Ровных Н.Л., Иванов Д.В., Сухенко Н.В., Кухар И.В., Калинин М.Д. Российский и мировой опыт выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны. – 2022. – Т. 40, № 4. – С. 250-258.
10. Bonnin S.M., Alvarez J.A., Faustino L.I., Graciano C. Revealing the physiological basis of forester's choice of poplar clones (Populus spp.) // iForest. – 2024. – Vol. 17. – P. 156-164. – DOI: 10.3832/ifor4433-017.
11. Blonskaya L., Sultanova R., Muftakhova S., Martynova M., Konashova S., Sabirzyanov I., Odintsov G. Biological indices of Bashkir Lombardy poplar (Populus nigra L. × Populus nigra var. italica Du Roi) in urban landscapes // Bulgarian Journal of Agricultural Science. – 2019. – Vol. 25, No. S2. – P. 30-36.

12. Gudynaitė-Franckevičienė V., Pliūra A. Performance and Genetic Parameters of Poplar Hybrids and Clones in a Field Trial Are Modified by Contrasting Environmental Conditions during the Vegetative Propagation Phase // Plants. – 2022. – Vol. 11(18). – P. 2401. – DOI: 10.3390/plants11182401.
13. da Mota Porto A.C., Novaes E. Prediction of current and future environmental suitability for Toona ciliata cultivation in Brazil // Discover Forests. – 2025. – Vol. 1. – P. 27. – DOI: 10.1007/s44415-025-00029-w.
14. dos Santos K.D.G., de Melo Ferreira W., Silva K.L.F. et al. Germination and initial development of Dipteryx alata Vogel (Fabaceae) in two “Cerrado” areas: a step toward its use in reforestation programs // Brazilian Journal of Botany. – 2018. – Vol. 41. – P. 415–424. – DOI: 10.1007/s40415-018-0453-0.
15. Thomas B.R., Schreiber S.G., Kamelchuk D.P. Impact of planting container type on growth and survival of three hybrid poplar clones in central Alberta, Canada // New Forests. – 2016. – Vol. 47. – P. 815–827. – DOI: 10.1007/s11056-016-9546-4.
16. Huang C., Lin L., Chen F., Wang X., Shi M., Chen L., Yang X., Dong X., Zhang M. Shading Effects on the Growth and Physiology of Endangered Hopea hainanensis Merr. & Chun Seedlings // Forests. – 2025. – Vol. 16(7). – P. 1193. – DOI: 10.3390/f16071193.
17. Evlakov P., Tseplyaev A., Popova A., Zapletin V., Ryzhkova V., Repnikova L., Zhuzhukin K. Influence of Container Volume and Cuttings Size on the Growth Parameters of Seedlings with a Closed Root System of Two Poplar Genotypes in the Voronezh Region // International Journal of Plant Biology. – 2025. – Vol. 16, No. 2. – P. 49. – DOI: 10.3390/ijpb16020049.
18. Ersson B.T., Laine T., Saksa T. Mechanized tree planting in Sweden and Finland: Current state and key factors for future growth // Forests. – 2018. – Vol. 9, No. 7. – P. 370. – DOI: 10.3390/f9070370.
19. Holden S.R., Treseder K.K. A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances // Frontiers in Microbiology. – 2013. – Vol. 4. – P. 163. – DOI: 10.3389/fmicb.2013.00163.
20. Reid W.V., Mooney H.A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science // Ecology, Economy and Society. – Singapore: Springer Singapore, 2018. – P. 49-61. – DOI: 10.1007/978-981-10-5675-8_4.

References

1. Romanov E. M. Vosproizvodstvo lesov v novoy strategii perekhoda k ustoychivomu razvitiyu lesnogo sektora Rossii. [Forest reproduction in the new strategy for the transition to sustainable development of the Russian forest sector]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Forests. Ecology. Environmental Management. 2021;(1):5-22. (In Russ.). DOI: 10.25686/2306-2827.2021.1.5.
2. Savchenkova V. A., Vasil'ev S. B., Nikitin V. F., Aksenov P. A. Produktivnost' lesnykh plantatsionnykh nasazhdeniy. [Productivity of forest plantation stands]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2021;(1):35-45. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-35-45.
3. Samarskaya V. O., Malaeva E. V., Postnova M. V. Aspekty klonal'nogo mikrorazmnozheniya i sokhraneniya rasteniy in vitro. [Aspects of clonal micropropagation and in vitro plant preservation]. Prirodnye sistemy i resursy = Natural Systems and Resources. 2019;9(3):13-22. (In Russ.). DOI: 10.15688/nsr.jvolsu.2019.3.2.
4. Nawaz M., Sun J., Shabbir S., Khattak W.A., Ren G., Nie X., Bo Y., Javed Q., Du D., Sonne C. A review of plants strategies to resist biotic and abiotic environmental stressors. Science of The Total Environment. 2023;900:165832. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165832.
5. Kakimzhanova A. A., Zhagipar F. S., Naziran F. Optimization of microclonal propagation conditions for increasing the multiplication factor of poplar microshoots. Vestnik Evraziyskogo natsional'nogo universiteta imeni L.N. Gumileva. Seriya: Biologicheskie nauki = Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Bioscience Series. 2019;(1):57-65. DOI: 10.32523/2616-7034-2019-126-1-57-65.
6. Bobushkina S. V., Sen'kov A. O., Fayzulin D. Kh. Praktika vyrashchivaniya lesnogo posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy primenitel'no k teplichnym kompleksam Arkhangel'skoy oblasti. [Practice of growing forest planting material with a closed root system for greenhouse complexes in the Arkhangelsk region]. Voprosy lesnoy nauki = Forest Science Issues. 2020;3(4):1-16. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16.

7. Mikhaylov K. L., Demina N. A. Ekonomicheskoe obosnovanie i prognoz investirovaniya v vyrashchivanie posadochnogo materiala khvoynykh porod derev'ev. [Economic justification and investment forecast for growing planting material of coniferous tree species]. Innovatsii v APK: problemy i perspektivy = Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects. 2024;(2):64-68. (In Russ.).
8. Zamolodchikov D. G., Grabovskiy V. I., Kaganov V. V. Ekosistemnye uslugi i prostranstvennoe raspredelenie zashchitnykh lesov Rossiyskoy Federatsii. [Ecosystem services and spatial distribution of protective forests of the Russian Federation]. Lesovedenie = Forest Science. 2021;(6):581-592. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114821060115.
9. Avdeeva E. V., Rovnykh N. L., Ivanov D. V., Sukhenko N. V., Kukhar I. V., Kalinin M. D. Rossiyskiy i mirovoy opyt vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy. [Russian and world experience in growing planting material with a closed root system]. Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the Boreal Area. 2022;40(4):250-258. (In Russ.).
10. Bonnin S.M., Alvarez J.A., Faustino L.I., Graciano C. Revealing the physiological basis of forester's choice of poplar clones (Populus spp.). iForest. 2024;17:156-164. DOI: 10.3832/ifor4433-017.
11. Blonskaya L., Sultanova R., Muftakhova S., Martynova M., Konashova S., Sabirzyanov I., Odintsov G. Biological indices of Bashkir Lombardy poplar (Populus nigra L. × Populus nigra var. italica Du Roi) in urban landscapes. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019;25(S2):30-36.
12. Gudynaitė-Franckevičienė V., Pliūra A. Performance and Genetic Parameters of Poplar Hybrids and Clones in a Field Trial Are Modified by Contrasting Environmental Conditions during the Vegetative Propagation Phase. Plants. 2022;11(18):2401. DOI: 10.3390/plants11182401.
13. da Mota Porto A.C., Novaes E. Prediction of current and future environmental suitability for Toona ciliata cultivation in Brazil. Discover Forests. 2025;1:27. DOI: 10.1007/s44415-025-00029-w.
14. dos Santos K.D.G., de Melo Ferreira W., Silva K.L.F. et al. Germination and initial development of Dipteryx alata Vogel (Fabaceae) in two "Cerrado" areas: a step toward its use in reforestation programs. Brazilian Journal of Botany. 2018;41:415–424. DOI: 10.1007/s40415-018-0453-0.
15. Thomas B.R., Schreiber S.G., Kamelchuk D.P. Impact of planting container type on growth and survival of three hybrid poplar clones in central Alberta, Canada. New Forests. 2016;47:815–827. DOI: 10.1007/s11056-016-9546-4.
16. Huang C., Lin L., Chen F., Wang X., Shi M., Chen L., Yang X., Dong X., Zhang M. Shading Effects on the Growth and Physiology of Endangered Hopea hainanensis Merr. & Chun Seedlings. Forests. 2025;16(7):1193. DOI: 10.3390/f16071193.
17. Evlakov P., Tseplyaev A., Popova A., Zapletin V., Ryzhkova V., Repnikova L., Zhuzhukin K. Influence of Container Volume and Cuttings Size on the Growth Parameters of Seedlings with a Closed Root System of Two Poplar Genotypes in the Voronezh Region. International Journal of Plant Biology. 2025;16(2):49. DOI: 10.3390/ijpb16020049.
18. Ersson B.T., Laine T., Saksa T. Mechanized tree planting in Sweden and Finland: Current state and key factors for future growth. Forests. 2018;9(7):370. DOI: 10.3390/f9070370.
19. Holden S.R., Treseder K.K. A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances. Frontiers in Microbiology. 2013;4:163. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00163.
20. Reid W.V., Mooney H.A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science. In: Dayal V. et al., eds. Ecology, Economy and Society. Singapore: Springer Singapore; 2018. P. 49-61. DOI: 10.1007/978-981-10-5675-8_4.

Сведения об авторах

Евлаков Петр Михайлович – кандидат биологических наук, зав. лабораторией анализа ПЦР дирекции НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0138-2410, e-mail: peter.evlakov@yandex.ru

✉*Цепляев Алексей Николаевич* – доктор с.-х. наук, профессор, кафедры ботаники и физиологи растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1938-5660, e-mail: vsealexey@mail.ru.

Попова Анна Александровна – доктор с.-х. наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4711-5377, e-mail: logachevaaa@rambler.ru

Рязанцева Ольга Сергеевна – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0009-0000-5227-3420, e-mail: dnb-87@mail.ru.

Information about the authors

Peter M. Evlakov – Cand. Sci. (Biol.), Head of Laboratory PCR Analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0138-2410, e-mail: peter.evlakov@yandex.ru.

✉ *Alexey N. Tseplyev* – Dr. Sci. (Agric.), Prof. department of botany and plant physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1938-5660, e-mail: vsealexey@mail.ru.

Anna A. Popova – Dr. Sci. (Agric.), Prof, department Botany and plant physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4711-5377, e-mail: logachevaaa@rambler.ru.

Olga S. Ryazantseva – post-graduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/ XXXX- 0009-0000-5227-3420, e-mail: dnb-87@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
УДК 630*181.7:528.88(470.31)
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/6

Определение закономерных связей таксационных показателей с применением данных дистанционного зондирования земли на примере сосновых древостоев Новгородской области

А.А. Иванов[1, 2], andrey.ivanov.1998@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-1411-8222
С.В. Коптев[3], s.koptev@narfu.ru , https://orcid.org/0000-0002-5402-1953

[1]Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, д.41, Великий Новгород, 173003, Российская Федерация; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru
[2]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru
[3]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация; e-mail: s.koptev@narfu.ru

В статье рассматривается проблема актуализации данных лесоустройства, так как настоящее время большая их часть содержат в себе данные, полученные 10 и более лет назад. Также ситуация усугубляется из-за плохой транспортной доступности лесов, что усложняет проведение лесоустройства классическими методами. Нами предложена технология получения таксационных данных (средних высот, диаметров и запасов насаждений) комбинированным способом с применением материалов дистанционного зондирования и использованием устоявшихся закономерных связей между количеством деревьев в насаждении и искомыми показателями, которые были выведены учеными в виде аллометрических уравнений ещё в начале прошлого столетия. Исходные данные дистанционного зондирования Земли были получены с беспилотного летательного аппарата самолетного типа. Благодаря этому в результате обработки данных съемки были получены ортофотопланы сверхвысокого качества (менее 5 см/пиксель), что является важным фактором для повышения точности определения количества деревьев. В данной работе применена методика автоматизированного подсчета количества деревьев, разработанная в среде математического моделирования, которая в настоящий момент проходит апробацию. Для выявления закономерных связей таксационных показателей насаждений были подвергнуты апробации правила Рейнеке, Уоды и Хилми, которые ранее в работах ученых показали сравнительно высокую степень точности определения таксационных данных. По результатам расчетов, проведенных для сосновых насаждений, данные по запасу и среднему диаметру оказались в пределах допустимых погрешностей. Данные по высоте деревьев, имели значительное отклонение, которое можно нивелировать введением дополнительного коэффициента, так как при расчетах для нескольких исследуемых участков ошибки были равными. В работе приведены коэффициенты, применение которых в уравнениях закономерных связей позволяет получать таксационные показатели дистанционным методом. По результатам работы можно прийти к выводам, что дальнейшее развитие технологий дистанционного зондирования Земли, последующее изучение закономерных связей между таксационными показателями деревьев и увеличение выборки исследований позволят разработать методики лесоустройства насаждений, которые помогут сократить издержки и сроки выполнения работ по актуализации лесного фонда России.

Ключевые слова: *лесоустройство, закономерные связи, число деревьев, запас насаждений, средний диаметр, средняя высота, дистанционное зондирование Земли, аллометрические уравнения, таксационные показатели*

Для цитирования: Иванов А.А., Коптев С.В. Определение закономерных связей таксационных показателей с применением данных дистанционного зондирования Земли на примере сосновых древостоев Новгородской области // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 95-108. – *Библиогр.: с. 105-107 (22 назв.)*. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/6.

Поступила 23.06.2025. ***Пересмотрена*** 12.10. 2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Determination of natural connections of taxation parameters using remote sensing data on the example of pine stands in the Novgorod region

Andrey.A. Ivanov[1, 2], andrey.ivanov.1998@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-1411-8222
Sergey.V. Koptev[3], s.koptev@narfu.ru, https://orcid.org/0000-0002-5402-1953

[1]*Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Bolshaya Sankt Peterburgskaya st., 41, Velikiy Novgorod, 173003, Russian Federation; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru*

[2]*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru*

[3]*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: s.koptev@narfu.ru*

Abstract

The article deals with the problem of updating forest inventory data, since currently most of them contain data obtained 10 or more years ago. The situation is also aggravated by poor transport accessibility of forests, which complicates the implementation of forest inventory using classical methods. The author proposes a technology for obtaining main taxation parameters (average heights, diameters and stocks of stands) in a combined way using remote sensing materials and well-established relationships between the quantity of trees and the desired parameters, which were derived by scientists into allometric equations at the beginning of the last century. The initial Earth remote sensing data were obtained from an aircraft-type unmanned aerial vehicle. Due to this, ultra-high-quality orthophotoplans (less than 5 cm/pixel) were obtained as a result of processing the survey data, which is an important factor for improving the accuracy of trees number determining. In this paper, we use a technique for automated counting of the trees number, developed in a mathematical modeling environment, which is currently being tested. In order to identify the regular relationships between the main parameters of stands, the Reinecke, Yoda and Hilmi rules were tested, which previously showed a relatively high degree of accuracy in determining the taxation parameters in the works of scientists. According to the results of calculations carried out in pine stands, the data on the growing stock and average diameter turned out to be within the margin of error. The data obtained on the height of the trees had a bigger deviation, which can be offset by introducing an additional coefficient, since the errors were equal when calculating several studied areas. The paper presents coefficients, the use of which in the equations of regular relationships allows to obtain taxation parameters by remote method. Based on the results of the work, it can be concluded that the further development of remote sensing technologies, the subsequent study of the natural relationships between the main taxation parameters of trees and an

increase in the sampling of studies will allow the development of forest inventory methods that will help reduce costs and deadlines for updating the Russian forest fund.

Keywords: *forest management, natural connections, counting the quantity of trees, volume stand, mean diameter, mean height, remote sensing of the Earth, allometric equations, regression analysis, cruise indicators*

For citation: Ivanov A.A., Koptev S.V. (2025) Determination of natural connections of taxation parameters using remote sensing data on the example of pine stands in the Novgorod region. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 4 (60), pp. 95-108 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/6.

Received 23.06.2025. ***Revised*** 12.10.2025. ***Accepted*** 30.10.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Согласно обновленному государственному лесному реестру на 2024 год площадь лесов России достигает 1,19 млрд га. В настоящее время общий спрос на актуальные лесоустроительные данные о лесах интенсивного освоения оценивается примерно в 300 млн га. [1]. Лесоустройство включает в себя комплекс мероприятий, одним из которых является оценка таксационных параметров лесных насаждений и должно проводиться на регулярной плановой основе с периодичностью проведения работ в границах земель лесного фонда один раз в 10 лет (для зоны интенсивного освоения лесов). Однако, на территории, составляющей более 80% площади земель лесного фонда Российской Федерации, лесоустройство проводилось более 10 лет назад. Особо следует отметить субъекты Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, где доля материалов лесоустройства давностью более 16 лет достигает 93,3 и 96,6 % соответственно [2, 3].

Таким образом, приведенные данные подчеркивают необходимость проведения масштабной работы по обновлению информации о лесах и созданию актуальной базы данных в том числе с использованием дистанционных методов и моделирования [4].

В данной работе предлагается новый подход к использованию материалов ДЗЗ для оценки таксационных параметров отдельных участков лесных насаждений с применением комбинации технологии автоматизированного расчета количества деревьев и аллометрических связей, определенных по средствам применения региональных таблиц хода роста насаждений сосны обыкновенной (Pinus sylvestris L.).

Для бореальных лесов Европейской части России исследования инвентаризации лесов на основе данных ДЗЗ и моделирования проводились в основном в направлении применения спектральных вегетационных индексов, классификации изображений, особенностей рельефа, для системы государственной инвентаризации лесов. [Черниховский Д.М, 2014, 2015, 2017].

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран квартал № 62 Пролетарского участкового лесничества, Новгородского лесничества. Фрагмент плана лесонасаждений представлен на рисунке 1.

Свежие данные лесоустройства, которые использовались для сопоставления с полученными результатами и также данные объекты относятся к категории особо защитных участков леса вблизи населенных пунктов, что исключает проведение в них рубок с момента последнего лесоустройства.

Для подтверждения достоверности данных лесоустройства, в 2022 году в границах рассматриваемых выделов были заложены две пробные площади размером 0,25 га. каждая. По результатам сплошного перечета древостоев и инструментальных измерений (мерная вилка, полнотомер, высотомер ЭТ-1М) было выявлено, что результаты достоверно не отличаются от материалов лесоустройства.

Методика полевых работ и дистанционного анализа

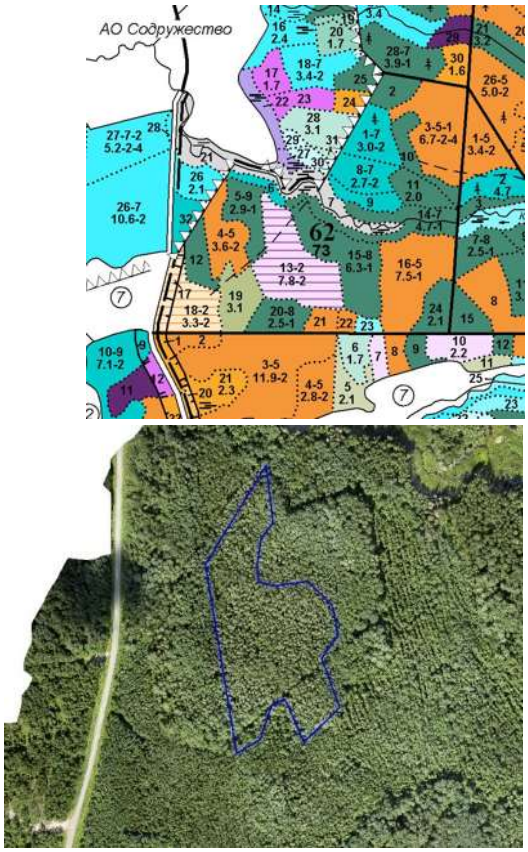


Рис. 1 Фрагмент плана и ортофотоплана лесонасаждений Пролетарского участкового лесничества.

Fig. 1 Fragment of the plan and orthophotoplane of the forest plantations of the Proletarian district forestry

Площадь квартала № 62 составляет 73 га. В качестве опытных объектов были выбраны таксационные выделы № 4 и 22 площадью 3,6 и 0,6 га соответственно. Данный квартал был выбран в связи с тем, что имел породный состав с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*). Характеристики выдела № 4 и 22 по данным лесоустройства 2019 года представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

– Характеристики лесотаксационных выделов № 4 и 22 Пролетарского участкового лесничества

– Characteristics of stratum № 4 and 22 of the Proletarian district forestry

№ выдела | № stratum	Состав древостоя | Stand structure	Диаметр, см | Diameter, cm	Высота, м | Height, m	Запас, м^3/га | Stock, m^3/ha
4	8С1Е1Ос+Б	24	25	– 350
22	5С4Ос1Б+Е	24	24	– 330

С использованием снимков высокого разрешения проводится подсчет количества деревьев на обследуемых участках с использованием автоматического способа. Данная методика подсчета количества деревьев имеет апробацию и сравнительно высокую точность показателей [5].

Материалы аэрофотосъемки были получены в 2022 году с беспилотного летательного аппарата самолетного типа Геоскан Lite оснащенного камерой Sony Alpha 6000 20 mm. Высота съемки составляла 300 метров от поверхности земли. Продольное и поперечное перекрытие снимков составляло 80% и 70% соответственно.

Первоначально выполняется конвертация снимков из формата .RAW в формат с геопространственной привязкой .TIFF, с последующей загрузкой их в программу Agisoft Metashape Professional для дальнейшей обработки.

Производится выравнивание снимков в высокой точности и построение плотного облака точек (исходные карты глубины, высокое качество, фильтрация карт глубины мягкая). Затем выполняется построение цифровой модели местности и ортофотоплан обследуемой местности (построение на основе ЦММ).

По материалам аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения возможно определение нескольких таксационных показателей, таких как площадь участка, породный состав, средняя высота (по цифровым моделям местности), число деревьев на участке и др.

Затем производится контурирование и обрезка выделов в геоинформационной системе MapInfo 17, путем наслоения на ортофотоплан привязанного плана лесонасаждений.

Затем в программе Adobe Photoshop выполняется обработка снимка, необходимая для дальнейшего его использования в программе SiminTech.

Предлагаемый метод направлен на автоматический подсчет деревьев по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения (4-5 см/пиксель) с увеличенным процентом перекрытия изображений, что позволяет снизить погрешность результатов. Процесс обработки изображений в SimInTech начинается с преобразования исходного кадра. Затем выполняется пороговое преобразование и маска сужения на основе команд разделения цветовых каналов и взвешенной суммы двух массивов. Конечный результат отображается в окне просмотра после выполнения команды слияния цветовых каналов. Автоматический подсчет количества деревьев на участке осуществляется с помощью блока Find contours в SimInTech. Крона каждого дерева выделяется на основе пика яркости и маски сужения.

Количество деревьев составило 438 шт. на 1 га площади исследуемого выдела №4. В выделе №22 количество деревьев составило 234 шт. на 1 га. При сопоставлении полученных данных с показателями, полученными на пробных площадях, было выявлено незначительное превышение значений (не более 3%).

Методы аллометрического моделирования

Для определения таксационных показателей древостоев было необходимо вывести коэффициенты по моделям закономерных связей между таксационными параметрами с применением таблиц хода роста нормальных и модальных древостоев. Многочисленные исследования свидетельствуют, что существует взаимосвязь между таксационными параметрами древостоев, такими как средний диаметр, высота и запас, и их относительной полнотой. Поскольку эти параметры меняются со временем и взаимосвязаны друг с другом, были сформулированы закономерности, которые нашли применение во многих отраслях, в том числе и в лесном хозяйстве [6,7,8,9].

Со второй половины прошлого века ученые используют степенные (экспоненциальные) уравнения, основанные на данных об изменениях параметров роста растений. [10,11,12,13,14,15].

Анализ литературы позволил выделить три ключевых аллометрических закономерности, которые описывают взаимосвязь между запасом древостоя, его средним диаметром и высотой, а также густотой.

Так первым было рассмотрена закономерность, открытая Уодой именуемое как «правило 3/2».

- «правило -3/2»

$$M = C_1 \times N^{-\frac{3}{2}}$$

где M - общий (суммарный) запас на единице площади, м^3 /га;

c1 –постоянная, безразмерная величина;

N – число деревьев на единице площади, шт/га.

В своих исследованиях Уода с коллегами, рассматривая зависимость массы растений от их количества, установил правило 3/2. Но поскольку в таблицах хода роста насаждений представлен запас на 1 га, то значение степени в теории должно быть равным 0,5. [16]

В 1944 году значительный отклик получила работа Дж. Киттреджа, который успешно применил аллометрическую формулу для сравнения

фитомассы крон деревьев и древостоев с диаметрами стволов [10].

Понятие аллометрии изначально означало неравномерный рост и относилось к морфологическим признакам. Однако со временем в качестве переменных x и y стали использоваться физиологические характеристики организмов [17, 10].

Позже Рейнеке установит зависимость между средним диаметром на высоте груди и числом стволов на единицу площади в сомкнутых насаждениях без ухода [18].

• правило Рейнеке

$$D = C_3 \times N^{-\frac{1}{2}}$$

где d – средний диаметр, см;

c3 –постоянная, безразмерная величина;

N – число деревьев на единице площади, шт./га.

Также интересно было рассмотреть правило Г.Ф. Хильми, описывающее зависимость между средней высотой древостоя и его густотой [11].

• правило Хильми

$$H = C_2 \times N^{-\frac{1}{2}}$$

где H – средняя высота, м;

c2 –постоянная, безразмерная величина;

N – число деревьев на единице площади, шт/га.

Постоянные величины определялись путем проведения регрессионного анализа на основе региональных таблиц хода роста сосновых древостоев зоны смешанных лесов Европейской части РФ [19]. Рассмотрению были подвергнуты зависимости среднего запаса, средней высоты и среднего диаметра от числа стволов на 1 га.

Расчетная часть

Следующим этапом исследования является определение постоянных C1, C2, C3 для рассмотренных ранее аллометрических зависимостей.

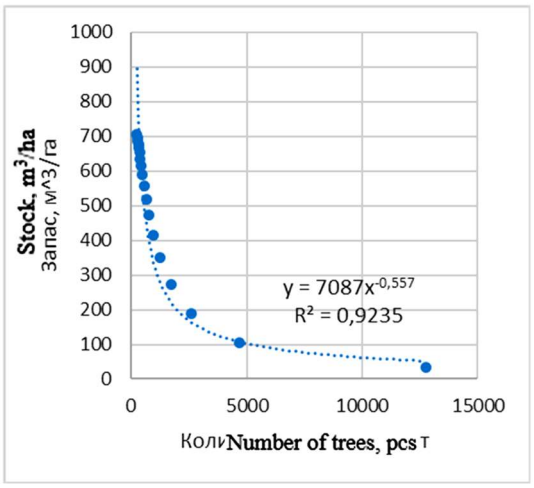
Определение постоянных проводилось путем построения моделей зависимости друг от друга рассматриваемых величин. Для расчета показателей были использованы общие и региональные таблицы хода роста нормальных и модальных сосновых насаждений для подзон южной тайги и хвойно-широколиственных лесов европейской части РФ. Новгородское лесничество располагается на стыке данных зон. [20, 21, 22]

Рассмотрим графики зависимости модальных сосновых насаждений. Графики зависимости запаса от количества деревьев на 1 га с разбивкой по бонитетам представлены ниже (рис. 2). Значения полученных параметров приведены в таблице 2. По результатам расчетов, определена сильная связь между рассматриваемыми показателями (более 0,9). Степень y зависимости отклоняется к проективной (0,5), что может говорить об увеличении степени отклонений получаемых показателей при использовании данных коэффициентов. Для их минимизации необходимо проводить анализ с закрепленной степенью 0,5

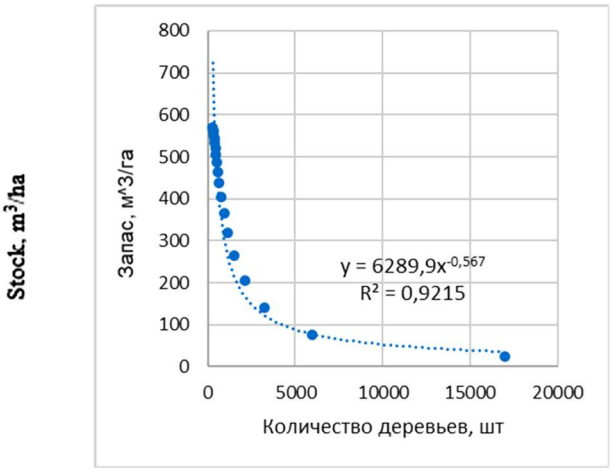
Рассмотрим графики зависимости среднего диаметра от количества деревьев на 1 га с разбивкой по бонитетам представлены ниже (рис. 3). Значения полученных параметров приведены в таблице 3. По результатам расчетов, определена сильная связь между рассматриваемыми показателями (более 0,9). Степень y зависимости близка к проективной (0,5), что может говорить о достоверности получаемых показателей при использовании данных коэффициентов.

Рассмотрим графики зависимости средней высоты от количества деревьев на 1 га с разбивкой по бонитетам представлены ниже (рис. 4). Значения полученных параметров приведены в таблице 4. По результатам расчетов, определена сильная связь между рассматриваемыми показателями (более 0,9). Степень y зависимости близка к проективной (0,5), что может говорить о достоверности получаемых показателей при использовании данных коэффициентов. Но из-за того, что при расчете коэффициентов закономерных связей, в угоду максимальной корреляции между показателями, имеются отклонения от проективной степени, было принято решение о применении иных степеней. За основу были взяты степени из расчета зависимостей показателей и округлены до целых. Так для расчета показателей запаса и диаметра древостоя применялась степень -0,6, а для расчета высоты древостоя -0,5.

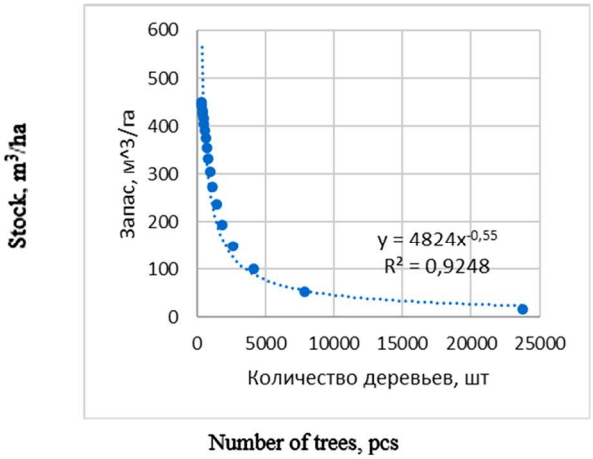
Затем были выполнены расчеты по ранее рассмотренным уравнениям аллометрических закономерностей с применением полученных коэфициентов и определенным по материалам АФС количеством деревьев по выделам. Результаты вычислений представлены в таблице 5.



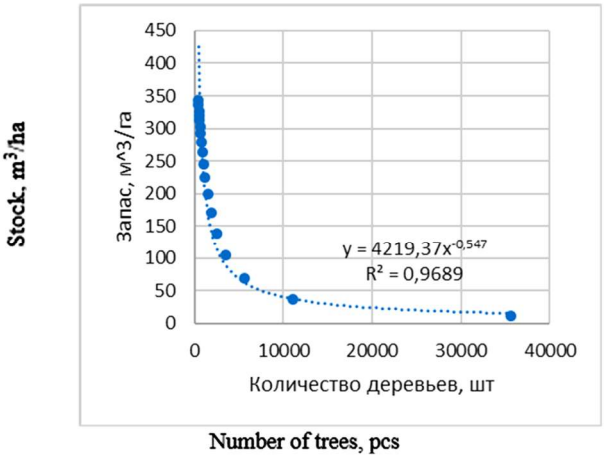
а. I бонитет | I bonity



б. II бонитет | II bonity



в. III бонитет | III bonity



г. IV бонитет | IV bonity

Рис. 2 Зависимость запаса модальных сосновых насаждений от их количества на 1 га по бонитетам (а, б, в, г)
Fig. 2 The dependence of the stock of modal pine plantations on their number per 1 ha according to the bonities (a, b, c, d)
Источник: собственная композиция авторов
Source: author´s own composition

Таблица 2
Table 2

Значения параметров аллометрического уравнения Уода
Values of the parameters of the allometric equation of the Yoda

Класс бонитета | Bonity class	Искомый коэффициент | The required coefficient	Коэффициент детерминации | Coefficient of determination	Степень функции | Degree of function
I	7087	0,9230	-0,557
II	6289	0,9210	-0,567
III	4824	0,9248	-0,550
IV	4219	0,9689	-0,547
V	3549	0,9486	-0,550

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: authors' own calculations.

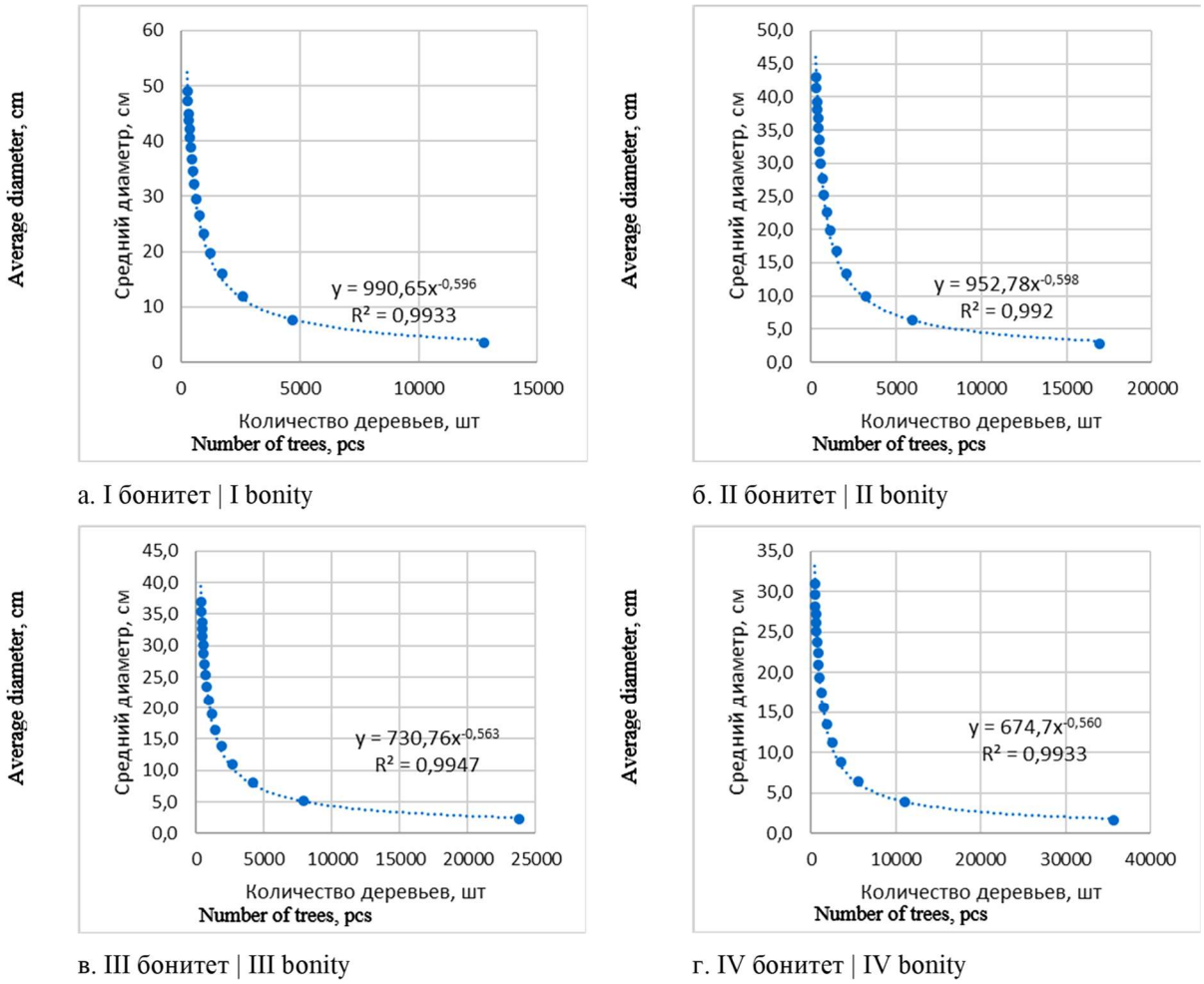


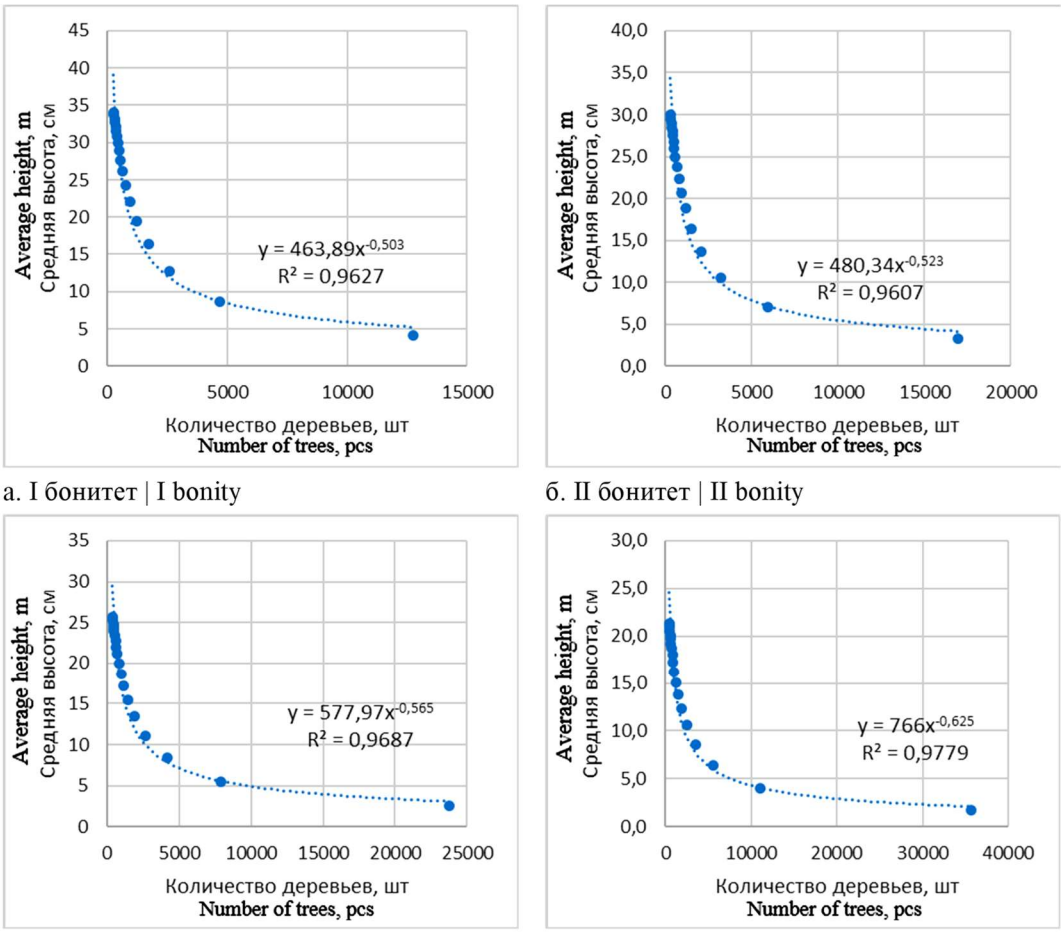
Рис. 3 Зависимость диаметра модальных сосновых насаждений от их количества на 1 га по бонитетам (а, б, в, г)
Fig. 3 The dependence of the diameter of modal pine plantations on their number per 1 ha according to the bonities (a, b, c, d)

Таблица 3
Table 3

Значения параметров аллометрического уравнения Рейнеке
Values of the parameters of the allometric Reineke equation

Класс бонитета | Bonity class	Искомый коэффициент | The required coefficient	Коэффициент детерминации | Coefficient of determination	Степень функции | Degree of function
I	990,65	0,9933	-0,596
II	952,78	0,9920	-0,598
III	730,76	0,9947	-0,563
IV	674,7	0,9933	-0,560
V	613,21	0,9805	-0,561

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: authors' own calculations.



а. I бонитет | I bonity

б. II бонитет | II bonity

в. III бонитет | III bonity

г. IV бонитет | IV bonity

Рис. 4 Зависимость высоты модальных сосновых насаждений от их количества на 1 га по бонитетам (а, б, в, г)
Fig. 4 The dependence of the height of modal pine plantations on their number per 1 ha according to the bonities (a, b, c, d)
Источник: собственная композиция авторов
Source: author´s own composition

Таблица 4
Table 4

Значения параметров аллометрического уравнения Хилми
Values of the parameters of the Hilmi allometric equation

Класс бонитета | Bonity class	Искомый коэффициент | The required coefficient	Коэффициент детерминации | Coefficient of determination	Степень функции | Degree of function
I	463,89	0,9627	-0,503
II	480,34	0,9607	-0,523
III	577,97	0,9687	-0,565
IV	766	0,9779	-0,625
V	1347,4	0,9873	-0,744

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: authors' own calculations.

Таблица 5
Table 5
Результаты моделирования и отклонения
Modeling results and deviations

Параметры | Parameters	Запас, м^3/га | Stock, m^3/ha	Высота, м | Height, m	Диаметр, см | Diameter, cm
выдел 4			
Результаты моделирования | Modeling results	301	23	25
Таксационные показатели | Taxation parameters	350	25	24
Отклонение | Deviation	-14%	-8%	4%
выдел 22			
Результаты моделирования | Modeling results	315	24	26
Таксационные показатели | Taxation parameters	330	24	24
Отклонение | Deviation	-5%	0%	8%

Обсуждение

По итогам проведенного исследования можно утверждать о том, что по результатам моделирования основных таксационных параметров были получены корректные данные в соответствии с допустимыми отклонениями, отраженными в лесоустроительной инструкции. Для смешанного по составу насаждения получены значения таксационных параметров более близкие к лесоустроительным данным. Результаты, полученные по закономерности Хилми, показали наименьшие отклонения от контрольных показателей. При этом, в расчетах зависимости показателей, в угоду высокому показателю коэффициента корреляции, программа автоматически выставляла степень. Она была близка к проектному показателю (-0,5) но в случае расчета высот наблюдалось максимальное отклонение относительно остальных случаев (до -0,7). Исходя из этого пришлось отойти от фиксированной степени -0,5. Благодаря этому, результаты, полученные по закономерностям Уоды, Рейнеке и Хилми показали значения с погрешностью, не выходящей за рамки лесоустроительной инструкции.

Расхождения модельных значений с таксационными могут быть связаны также с возможной ошибкой при подсчете количества деревьев. Отклонения, в большей степени, зависят от сомкнутости полога насаждений. В низкополнотных насаждениях система автоматического подсчета может помимо крон основного полога выделять также подрост и подлесок, что может завышать количественные показатели, что за собой влечет погрешность в результатах (завышение запаса, и занижение средней высоты насаждения).

Заключение

В целом, предложенный метод позволяет наиболее точно определять основные таксационные показатели для одноярусных сомкнутых насаждений. На основе разработанных аллометрических моделей показана возможность определения таксационных показателей с погрешностью по определению запаса древостоев не более 15%, средних высот и диаметра древостоев - не более 8%. Данные значения не превышают установленные значения точности определения основных таксационных показателей лесоустроительной инструкцией. Применяя данную аллометрическую модель можно рассчитать показатели для большинства пород, произрастающих на территории РФ, с использованием соответствующих региональных таблиц хода роста древостоев. При наличии авиапарка и достаточного количества операторов БПЛА можно увеличить периодичность проведения наземных лесоустроительных работ. Своевременное

получение данных о характеристиках лесных насаждений позволит оперативно реагировать на последствия природных бедствий, таких как ветровалы, пожары, что позволит иметь постоянную актуальную информацию в лесоустроительных данных.

Список литературы

1. Сведения государственного лесного реестра на 2022 год. URL: https://roslesinforg.ru/news/all/6679/
2. Краскова А.Н. К вопросу о финансировании мероприятий по лесоустройству // Сибирский юридический вестник. – 2024. – № 3(106). – С. 25-32. – DOI: 10.26516/2071-8136.2024.3.25.
3. Алексеев А.С., Михайлова А.А., Черниховский Д.М., Березин В.И. Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения // Трубы Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2017. – № 2. – С. 67-77. – DOI: 10.21178/2079-6080.2017.2.67.
4. United Nations Strategic Plan for Forests 2017–2030. URL: https://www.un.org/esa/forests/documents/un-strategic-plan-for-forests-2030/index.html
5. Иванов А.А., Лукашик Е.Е. Метод автоматизированного определения количества деревьев в лесном насаждении на основе цифрового анализа материалов аэрофотосъемки // Цифровые технологии в лесном секторе: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции-вебинара. – СПб., 2022. – С. 35-38.
6. Kittredge, J. (1944). Estimation of the amount of foliage on trees and stands. Journal of Forestry, 42(12), 905–912. https://doi.org/10.1093/jof/42.12.905
7. Pretzsch, H. (2002). A unified law of spatial allometry for woody and herbaceous plants. Plant Biology, 4, 159–166. https://doi.org/10.1055/s-2002-25732
8. Pretzsch, H. (2005). Link between the self-thinning rules for herbaceous and woody plants. Scientia Agriculturae Bohemica, 36(3), 98–107.
9. Pretzsch, H. (2006). Species-specific allometric scaling under self-thinning: evidence from long-term plots in forest stands. Oecologia, 146(4), 572–583. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0126-0
10. Cabrera, M., Samboni-Guerrero, V., & Duivenvoorden, J.F. (2018). Non-destructive allometric estimates of above-ground and below-ground biomass of high-mountain vegetation in the Andes. Applied Vegetation Science, 21(3), 477–487. https://doi.org/10.1111/avsc.12381
11. Conti, G., Enrico, L., Casanoves, F., & Diaz, S. (2013). Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbon stock. Annals of Forest Science, 70(5), 515–524. https://doi.org/10.1007/s13595-013-0285-9
12. Oliveras, I., Van der Eynden, M., Malhi, Y., Cahuana, N., Menor, C., Zamora, F., & Haugaasen, T. (2014). Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. Austral Ecology, 39, 408–415. https://doi.org/10.1111/aec.12098
13. Porté, A.J., Samalens, J.C., Dulhoste, R., Ducros, R.T., Bosc, A., & Meredieu, C. (2009). Using cover measurements to estimate aboveground understorey biomass in Maritime pine stands. Annals of Forest Science, 66, 307. https://doi.org/10.1051/forest/2009005
14. Schulze, I.-M., Bolte, A., Schmidt, W., & Eichhorn, J. (2009). Phytomass, litter and net primary production of herbaceous layer. In R. Brumme & P.K. Khanna (Eds.), Functioning and Management of European Beech Ecosystems (pp. 155–181). Springer. https://doi.org/10.1007/b82392_11
15. Богданов А.П., Третьяков С.В., Цветков И.В. Оценка точности определения запаса в молодняках и средневозрастных древостоях по результатам наблюдений на стационарных объектах в Мурманской области различными способами // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 5. – С. 13-18. – DOI: https://doi.org/10.17513/use.38035
16. Михайлова А.А. Моделирование таксационных характеристик насаждений с использованием аллометрических правил и аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения: автореф. дис. … канд. с.-х. наук. – СПб., 2017. – 28 с.

17. Голуб В.Б., Николайчук Л.Ф. Л.Г. Раменский и аллометрия растений (история и современное состояние проблемы) // Разнообразие растительного мира. – 2021. – № 1(8). – С. 30-50. – DOI: 10.22281/2686-9713-2021-1-30-50
18. West, P. (2021). Using Reineke's model to quantify the maximum density of a tree stand. Academia Letters, Article 973. https://doi.org/10.20935/AL973
19. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., & Nilsson, S. (2008). Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials) (2nd ed.). Federal Agency of Forest Management of Russia and International Institute for Applied Systems Analysis. URL: https://www.researchgate.net/publication/241703708_Tables_and_models_of_growth_and_productivity_of_forests_of_major_forest_forming_species_of_Northern_Eurasia_standard_and_reference_materials
20. Chave, J., Rejou-Mechain, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martinez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pelissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the above-ground biomass of tropical trees. Global Change Biology, 20(10), 3177–3190. https://doi.org/10.1111/gcb.12629
21. Coefficient of Determination: How to Calculate It and Interpret the Result. URL: https://www.investopedia.com/terms/c/coefficient-of-determination.asp
22. Pottier, J., & Jabot, F. (2017). Non-destructive biomass estimation of herbaceous plant individuals: A transferable method between contrasted environments. Ecological Indicators, 72, 769–776. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.030

References

1. Svedeniya gosudarstvennogo lesnogo reestra na 2022 god. [Data of the state forest register for 2022]. URL: https://roslesinforg.ru/news/all/6679/
2. Kraskova A.N. K voprosu o finansirovanii meropriyatij po lesoustrojstvu. [On the issue of financing forest management measures]. Sibirskij yuridicheskij vestnik = Siberian Legal Bulletin. 2024;3(106):25-32. (In Russ.). DOI: 10.26516/2071-8136.2024.3.25
3. Alekseev A.S., Mihajlova A.A., Chernihovskij D.M., Berezin V.I. Metod opredeleniya taksacionnyh harakteristik nasazhdenij po aerofotosnimkam sverhvysokogo razresheniya. [Method for determining forest inventory characteristics of stands using ultra-high resolution aerial photographs]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva = Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry. 2017;2:67-77. (In Russ.). DOI: 10.21178/2079-6080.2017.2.67
4. United Nations Strategic Plan for Forests 2017–2030. URL: https://www.un.org/esa/forests/documents/un-strategic-plan-for-forests-2030/index.html
5. Ivanov A.A., Lukashik E.E. Metod avtomatizirovannogo opredeleniya kolichestva derev'ev v lesnom nasazhdenii na osnove cifrovogo analiza materialov aerofotos"emki. [Method for automated determination of the number of trees in a forest stand based on digital analysis of aerial photography materials]. Cifrovye tekhnologii v lesnom sektore: Materialy III Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii-vebinara = Digital technologies in the forest sector: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference-Webinar. Saint Petersburg; 2022:35-38. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49615672
6. Kittredge J. Estimation of the amount of foliage on trees and stands. Journal of Forestry. 1944;42(12):905-912. DOI: 10.1093/jof/42.12.905
7. Pretzsch H. A unified law of spatial allometry for woody and herbaceous plants. Plant biology. 2002;4:159-166. DOI: 10.1055/s-2002-25732
8. Pretzsch H. Link between the self-thinning rules for herbaceous and woody plants. Scientia Agriculturae Bohemica. 2005;36(3):98-107. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=zcFDgrgAAAAJ&cstart=600&pagesize=100&sortby=pubdate&citation_for_view=zcFDgrgAAAAJ:DUooU5lO8OsC

9. Pretzsch H. Species-specific allometric scaling under self-thinning: evidence from long-term plots in forest stands. Oecologia. 2006;146(4):572-583. DOI: 10.1007/s00442-005-0126-0
10. Cabrera M., Samboni-Guerrero V., Duivenvoorden J.F. Non-destructive allometric estimates of above-ground and below-ground biomass of high-mountain vegetation in the Andes. Applied Vegetation Science. 2018;21(3):477-487. DOI: 10.1111/avsc.12381
11. Conti G., Enrico L., Casanoves F., Diaz S. Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbon stock. Annals of Forest Science. 2013;70(5):515-524. DOI: 10.1007/s13595-013-0285-9
12. Oliveras I., Van der Eynden M., Malhi Y., Cahuana N., Menor C., Zamora F., Haugaasen T. Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. Austral Ecology. 2014;39:408-415. DOI: 10.1111/aec.12098
13. Porté A.J., Samalens J.C., Dulhoste R., Ducros R.T., Bosc A., Meredieu C. Using cover measurements to estimate aboveground understorey biomass in Maritime pine stands. Annals of Forest Science. 2009;66:307. DOI: 10.1051/forest/2009005
14. Schulze I.-M., Bolte A., Schmidt W., Eichhorn J. Phytomass, litter and net primary production of herbaceous layer. In: Brumme R., Khanna P.K. (Eds). Functioning and Management of European Beech Ecosystems. 2009;208:155-181. DOI: 10.1007/b82392_11
15. Bogdanov A.P., Tret'yakov S.V., Cvetkov I.V. Ocenka tochnosti opredeleniya zapasa v molodnyakah i srednevozrastnyh drevostoyah po rezul'tatam nablyudenij na statsionarnyh ob"ektah v Murmanskoj oblasti razlichnymi sposobami. [Accuracy assessment of stock determination in young and middle-aged stands based on observations at stationary sites in the Murmansk region by various methods]. Uspehi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences. 2023;5:13-18. (In Russ.). DOI: 10.17513/use.38035
16. Mihajlova A.A. Modelirovanie taksacionnyh harakteristik nasazhdenij s ispol'zovaniem allometricheskih pravil i aerofotos"emki sverhvysokogo razresheniya. [Modeling of forest inventory characteristics of stands using allometric rules and ultra-high resolution aerial photography]. Abstract of PhD thesis. Saint Petersburg; 2017. 28 p. (In Russ.). URL: https://spbftu.ru/uploads/disser/dissertations/18_Mixajlova%20Anna%20Arkad%60evna/Avtoreferat.pdf
17. Golub V.B., Nikolajchuk L.F. L.G. Ramenskij i allometriya rastenij (istoriya i sovremennoe sostoyanie problemy). [L.G. Ramensky and plant allometry (history and current state of the problem)]. Raznoobrazie rastitel'nogo mira = Plant Diversity. 2021;1(8):30-50. (In Russ.). DOI: 10.22281/2686-9713-2021-1-30-50
18. West P. Using Reineke's model to quantify the maximum density of a tree stand. Academia Letters. 2021:Article 973. DOI: 10.20935/AL973
19. Shvidenko, A., Schepaschenko, D., & Nilsson, S. (2008). Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials) (2nd ed.). Federal Agency of Forest Management of Russia and International Institute for Applied Systems Analysis. URL: https://www.researchgate.net/publication/241703708_Tables_and_models_of_growth_and_productivity_of_forests_of_major_forest_forming_species_of_Northern_Eurasia_standard_and_reference_materials
20. Chave J., Rejou-Mechain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martinez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G., Vieilledent G. Improved allometric models to estimate the above-ground biomass of tropical trees. Global Change Biology. 2014;20:3177-3190. DOI: 10.1111/gcb.12629
21. Coefficient of Determination: How to Calculate It and Interpret the Result. URL: https://www.investopedia.com/terms/c/coefficient-of-determination.asp
22. Pottier J., Jabot F. Non-destructive biomass estimation of herbaceous plant individuals: A transferable method between contrasted environments. Ecological Indicators. 2017;72:769-776. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.08.030

Сведения об авторах

Иванов Андрей Алексеевич – ведущий техник-технолог лаборатории беспилотных систем и цифровой инженерии ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», ул. Большая Санкт-Петербургская д. 41, г. Великий Новгород, Российская Федерация, 173003; аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1411-8222, e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru

Коптев Сергей Викторович – доктор с/х наук, доцент, зав. кафедры лесоводства и лесоустройства ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5402-1953, e-mail: s.koptev@narfu.ru

Information about the authors

Andrey.A. Ivanov – Leading Technology Technician at the Laboratory of Unmanned Systems and Digital Engineering Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Bolshaya Sankt Peterburgskaya st., 41, Velikiy Novgorod, Russia, 173003, Postgraduate Student; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1411-8222, e-mail: andrey.ivanov.1998@yandex.ru

Sergey.V. Koptev – Doctor of Agricultural Science, Professor; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5402-1953, e-mail: s.koptev@narfu.ru

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/7
УДК 630*575.22:582.623.2

Феногенетический анализ стабильности развития вегетативных органов берёзы повислой и березы пушистой

Игорь Ю. Исаков[1]✉, labgen@vglta.vrn.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-2927-3275
Константин А. Шестибратов[2], schestibratov.k@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-1996-6433

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 364087, Российская Федерация*
[2]*Филиал ГНЦ ИБХ РАН, Проспект Науки 6, г. Пущино, 142290, Российская Федерация*

В статье приводятся данные экспериментов по определению стабильности развития (на примере листовых пластинок) у деревьев, полученных путем самоопыления и свободного опыления семей от материнских деревьев берёзы пушистой Б-11 и Б-14 (семенного происхождения). Проведен однофакторный дисперсионный анализ ANOVA признака длина листовой пластинки для двух видов – берёзы пушистой и повислой, различающихся по системам размножения, аллогамных и аутогамных форм. Материнские деревья этих видов были отобраны в Воронежском государственном природном биосферном заповеднике им. В.М. Пескова (ВГПБЗ), там же (кв. 298) созданы путем гибридизации и самоопыления испытательные культуры F_1. Получены данные о нарушении билатерального развития листовых пластинок березы, что характерно для экологически неблагоприятного местопроизрастания деревьев, хотя опытные растения находятся в экологически чистых условиях ВГПБЗ. В первом случае для всех деревьев берёзы пушистой (независимо от способа опыления) получены контрольные баллы, превышающие стандартный показатель, приведённый в нормативных документах по оценке состояния окружающей среды, превышения составили от 2,4 (Б-14 со) до 5,6 (Б-11 св) раз. Подтверждена фенотипическая нестабильность вегетативных органов у полиплоидного вида берёзы по сравнению с диплоидным, что может влиять на продуктивность берёзовых насаждений.

Ключевые слова: *стабильность развития, листовая пластинка, берёза повислая, берёза пушистая, аллогамия, аутогамия, фенотип, ANOVA - анализ*

Финансирование: Исследования проводились в рамках реализации гранта РНФ № 22-64-00036.
Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исаков И.Ю., Шестибратов К.А. Феногенетический анализ стабильности развития вегетативных органов берёзы повислой и березы пушистой // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 109-124. – *Библиогр.: с. 120-124 (32 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/7.

Поступила 14.10.2025. ***Пересмотрена*** 10.11.2025. ***Принята*** 12.12.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Stability of development and phenogenetic analysis in silver birch and downy birch

Igor Yu. Isakov[1]✉, labgen@vglta.vrn.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-2927-3275
Konstantin A. Shestibratov[2], schestibratov.k@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-1996-6433

[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8 Timirjazev Street, Voronezh, 364087, Russian Federation*
[2] *Branch of the Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290, Russian Federation*

Abstract

The article presents the data of experiments on determination of development stability (using leaf blades as an example) in trees obtained by self-pollination and open pollination of families from maternal trees of downy birch B-11 and B-14 (of seed origin). A one-way ANOVA analysis of variance was performed for the leaf blade length trait for two species – downy birch and silver birch, differing in reproduction systems, allogamous and autogamous forms. As a result, it was shown that the leaf blade length in highly self-fertile forms of downy birch significantly differs with different methods of pollination of maternal trees – self-pollination and open pollination. The maternal trees of these species were selected in the Voronezh State Nature Biosphere Reserve named after V.M. Peskov (VGPBZ), where test cultures F_1 were created by hybridization and self-pollination (sq. 298). The data on the violation of bilateral development of birch leaf blades, which is typical for ecologically unfavorable habitats of trees, were obtained, although the experimental plants are in ecologically clean conditions of the VGPBZ. In the first case, for all downy birch trees (regardless of the pollination method), control scores were obtained that exceeded the standard indicator given in the regulatory documents for assessing the state of the environment, the excesses amounted to 2.4 (B-14 sp) to 5.6 (B-11 op) times. Phenotypic instability of vegetative organs in the polyploid birch species compared to the diploid one was confirmed, which can affect the productivity of birch plantations.

Keywords: *developmental stability, leaf blade, silver birch, downy birch, allogamy, autogamy, phenotype, ANOVA analysis*

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 22-64-00036, https://rscf.ru/project/22-64-00036/.
Acknowledgments: authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.
Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: I.Yu. Isakov, K.A. Shestibratov (2025). Stability of development and phenogenetic analysis of development in silver birch and downy birch. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 109-124 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/7.

Received 14.10.2025. ***Revised*** 10.11.2025. ***Accepted*** 12.12.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

В контексте ускоренного лесовосстановления одним из приоритетных направлений является получение потомства с оптимизированными генетическими и селекционными характеристиками.

Для достижения этой цели используются семена, полученные от материнских деревьев, прошедших строгий отбор по параметрам быстрого роста и высокой продуктивности. Разработка эффективных селекционных программ для древесных растений, в том числе березы, невозможна без детального изучения генетического разнообразия исходного материала – деревьев, произрастающих в естественных популяциях, в том числе, и по системам семенного размножения.

Естественная гибридизация является характерной для берез. Изучение механизмов как естественной, так и искусственной гибридизации имеет существенное значение для понимания в области эволюции, филогении, филогеографии, лесоводства этого рода [1,2,3].

Проблема естественной гибридизации у берез тесно связана с определением таксономического статуса возникающих гибридов и их идентификацией. В настоящее время не существует единого подхода к классификации гибридов берез. Чаще всего спонтанные гибриды видов берез описываются как самостоятельные виды или внутривидовые таксоны [4].

Для уточнения вопросов, связанных с систематической принадлежностью гибридов и понимания их гибридного потенциала в роде Betula sp. необходимы контролируемые скрещивания, которые позволят получить более объективное представление об этом явлении (Evolutionary Developmental Biology, Evo-Devo) [5,6].

Кроме того, значительный интерес представляет выведение, испытание на рост и развитие новых селекционных форм березы, полученных как методом семенного, так и вегетативного размножения.

Тот факт, что естественный отбор может изменять распределение фенотипического разнообразия, а распределение фенотипического разнообразия может изменять селективные давления на последующие эволюционные изменения, является примером 'взаимной причинности' в эволюции [7,8].

В процессе развития предрасположенность производить определенные фенотипы может повлиять на скорость и направление последующей эволюции. В частности, процесс развития настроен на производство определенных фенотипов, которые были отобраны в прошлом. А это, в свою очередь, может способствовать эволюции в популяции таких фенотипов (или схожих фенотипов), если они будут выбраны в будущем [9].

Большой вклад в понимание взаимодействия эволюции, фенотипа и генотипа организма внесли [10], которые сформировали новую теорию облегченной изменчивости (Facilitated Variation - FV), объединив в ней открытия в области эволюции, генетики и биологии развития. Ключевое её положение заключается в том, что случайные генетические изменения в организмах преобразуются в фенотипические, которые потенциально полезны, а эволюция биологических систем усиливается в средах, которые время от времени изменяются систематическим образом [11]. Кроме того, наши знания геномной основы фенотипов лесных деревьев отстают от знаний таких основ других экономически важных организмов [12].

Таким образом, изучение вариабельности фенотипа является актуальной и необходимой задачей. Взаимовлияние фенотипа и генотипа организма может иметь разные функциональные зависимости, от прямых до опосредованных, непрямых. Эти функции выражаются в статистических показателях варьирования признака.

Листья берез разнообразны по форме и строению, поэтому их используют для характеристики форм и направлений изменчивости. Важной характеристикой морфологических признаков вегетативных органов растений является частота распределения симметричных и асимметричных листьев. Предполагается, что при её исследовании выявляется сила связи между симметрией строения и стабильностью развития. Прежде, чем использовать листья какого-либо вида растений в качестве тест-объекта для оценки состояния окружающей среды, необходимо предварительно определить, есть ли связь между «признаками билатерально-симметричного строения и стабильностью развития. Критерием наличия такой связи является полимодальная кривая распределения этих листьев … в один ряд закономерно чередующихся симметричных и асимметричных форм» [13]. При сравнении типичных (берёза повислая) и аберрантных (далекарлийская берёза) листовых пластинок установлено, что структурная сложность листа может быть увеличена за счет изменения рахиса в эмбриогенезе для мест закладок жилок 1-го порядка.

В Европейской части России естественно произрастают два основных вида берёз из рода Betula - береза повислая и б. пушистая [14].

Важность изучения функциональных особенностей растений на видовом уровне

подчеркивают Rodríguez-Castilla G. и др. [15]. Индекс формы листовых пластинок (LSI) и содержание углерода являются ключевыми характеристиками для оценки состояния экосистем. LSI чувствителен к структурным особенностям и легко измеряется, что делает его ценным для мониторинга. Другие характеристики листьев (например, LDMC (содержание сухого вещества), LD (плотность), азот, площадь листьев) проявляли влияние в зависимости от типа леса.

К функциональным признакам листа относят: индекс формы листа (LSI, длина/ширина листа), содержание углерода в листьях (C) и содержание сухого вещества в листьях (LDMC). Ключевые характеристики растений, такие как масса листьев на единицу площади (LMA), плотность листьев (LD) и содержание сухого вещества в листьях (LDMC), служат индикаторами реакции растений на стресс и повреждаемость насекомыми; ожидается, что аридизация, вызванная изменением климата, изменит динамику взаимоотношений растений и насекомых и функциональные стратегии растений [16].

Количественные характеристики листьев, их размеры являются важными факторами, определяющими продуктивность древесных растений. Для берез высота дерева и средний размер листьев могут независимо контролировать структуру и физиологию листьев, оказывая ещё большее влияние на распределение биомассы, изменение уровня освещенности внутри растения само по себе не объясняет наблюдаемые закономерности. Обнаружена тесная зависимость между биомассой ствола берез и размерами клеток мезофилла. В южной части трансекты характер этой связи был положительным, в то время как для северного участка трансекты найдены отрицательные корреляции между данными параметрами. Это свидетельствует о том, что аккумуляция биомассы в условиях низких температур и дефицита влаги обеспечивается разными механизмами структурной адаптации фотосинтеза [19].

Уменьшение размеров фотосинтетических клеток в лесостепных и степных популяциях берез обеспечивает высокую скорость внутрилистового поглощения CO^2, поскольку мелкие клетки характеризуются большой поверхностью в расчете на единицу объема, что увеличивает скорость диффузии CO^2 [20].

Генетическое разнообразие внутри популяций и между ними, а также фенотипическая пластичность ключевых фенологических событий, таких как появление листьев или цветков, играют решающую роль в адаптации и, следовательно, в выживании видов и их конкурентоспособности в контексте быстрого продолжающегося изменения климата [21].

Имеются и другие факторы, кроме генетики, которые следует учитывать при создании лесосеменных плантаций лесных деревьев [22].

Согласно классификации [23], род Betula (Берёза) включает пять подродов: Betulenta, Betulaster, Neurobetula, Betula и Chamaebetula. Число хромосом у видов в каждом подроде варьируется: от диплоидных (2n=28) до додекаплоидных (12n=168).

Исследователи отмечают, что в зависимости от классификации количество видов березы колеблется от 30 до более 60.

С начала текущего столетия активно изучается интрогрессивная гибридизация у березы, как механизм, способный увеличить генетическое разнообразие и повысить адаптивность видов к стрессовым факторам окружающей среды. В частности, предполагается, что значительная вариативность как внешних признаков, так и генетического материала у тетраплоидной березы пушистой в Исландии является следствием переноса генов от диплоидной карликовой березы (B. nana) в результате интрогрессии. Эта гипотеза подкрепляется данными, полученными на разных уровнях анализа: морфологическом, хромосомном и молекулярном [24].

Тетраплоиды *Betula platyphylla* Sukaczev имеют значительно более крупные листья, плоды и устьица (гигантский фенотип), чем диплоиды того же вида; однако механизм этого различия остаётся неясным. Данные транскриптома тетраплоида B. platyphylla указывают на то, что экспрессия генов, связанных с биосинтезом индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) и передачей сигнала, изменилась после дупликации генома [25].

Изучению феномена флуктуирующей асимметрии (ФА) посвящено много работ, в основном, русскоязычных авторов. Они подразделяются на прямой и косвенный мониторинг

(26). Скептицизм в отношении этого метода оценки состояния окружающей среды выражается с двух сторон: эмпирическими данными и методологическими. Известно также о критическом анализе к методологии, применяемой в этих исследованиях [27,28], заключающемся в аргументированных противоречиях сбора растительного материала и измерения ФА, таких как тот факт, что авторы практических рекомендаций [29] упустили из виду существенный объем исследований, не зафиксировавших увеличения функциональной активности (ФА) в деградированных местообитаниях. Определение ФА представляет собой элементарную процедуру, не требующую специальной подготовки или применения сложных инструментов. Существуют унифицированные шкалы для оценки значений ФА, что позволяет проводить сравнение полученных результатов с эталонными данными. Возможно, полиплоидия вносит свой вклад в эти противоречия [30].

Следует отметить, что береза, являясь популярным объектом изучения российских исследователей, часто образует межвидовые гибриды как в естественных, так и в искусственных условиях [31]. В связи с этим, значительная часть межпопуляционной вариабельности ФА у берез может быть обусловлена именно различным соотношением гибридных особей, а не воздействием факторов окружающей среды. Также, в связи с этим получение экстремальных результатов (менее 0,03 и свыше 0,069), должно служить основанием для проведения сверки и поиска причин получения аномальных значений [32].

Стабильность онтогенетического развития, то есть способность организма к нормальному росту и развитию без отклонений и ошибок, служит чувствительным индикатором состояния популяций в природной среде. Оценивая степень стабильности развития, можно судить о совокупном воздействии антропогенных факторов на экосистему.

Наиболее доступным и простым методом оценки стабильности развития является измерение степени флуктуирующей асимметрии билатерально расположенных морфологических признаков. Таким образом, у берёзы проводились многочисленные исследования на предмет использования этого дерева в качестве тест-объекта для оценки состояния окружающей среды. Однако комплексных исследований, включающих морфологию, видовое разнообразие и биометрическую статистику на примере изучения вегетативных органов берёз, крайне мало. В этой работе мы постарались объединить указанные подходы применительно к полученным селекционным формам берёз.

Целью работы является оценка стабильности развития генотипов берёзы пушистой и берёзы повислой, относящихся к селекционной категории высокосамофертильных. К задачам относятся: 1. Проанализировать изменчивость листовых пластинок на предмет листовой асимметрии. 2. На указанном растительном материале семенного потомства F_1 провести однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и выявить достоверность различий между селекционными формами. 3. Дать сравнительную оценку биометрических и морфологических показателей у селекционных форм двух видов берёз.

Материалы и методы

Семенное потомство берёзы пушистой и повислой произрастает на специально созданном объекте – биоресурсной коллекции селекционных форм и гибридов берёзы ВГЛТУ. Особенностью данного опыта было то, что все деревья первого поколения берёзы пушистой произрастают в квартале 298 Воронежского государственного природного биосферного заповедника, т.е. достаточно далеко от мест какого-либо загрязнения, в экологически чистой среде. Таким образом фактор внешнего загрязнения среды был сведён к минимуму.

Краткая характеристика материнских деревьев двух видов берёз. Ранее была определена типизация материнских деревьев этих видов по восприимчивости к самоопылению по признаку рост в высоту и введению индекса самофертильности при селекционной инвентаризации (Таблица 1).

Под системой размножения понимается отнесение конкретного дерева или к ауто-, или к аллогамной, или к переходной форме. Эта

классификация была присвоена деревьям в результате теста на инбридинг.

Методика сбора листьев. Листья были собраны на объекте ЕГСК – испытательных культурах берёзы первого поколения, семенного происхождения. Для унификации материала сбор листьев произведен с западной стороны средней части крон деревьев известного генетического происхождения. Деревья берёзы пушистой, как и повислой были получены при самоопылении материнских деревьев, растущих в Воронежском Государственном Природном Биосферном заповеднике.

Таблица 1

Отнесение опытных деревьев берёзы повислой и пушистой к селекционной категории высокосамофертильных деревьев ($И_{сф} > 1$)

Table 1

Classification of experimental trees of silver and downy birch to the selection category of highly self-fertile trees ($I_{sf} > 1$)

Индекс материнского дерева | Mother tree index	Количество деревьев в семье | Number of trees in a family	Способ опыления | Pollination method	Рост в высоту, $M \pm m_x$, м | Height growth, $M \pm m_x$, m	Ср. квадр. откл. σ, м | Standard deviation σ, m	Коэффициент вариации, Cv, % | Coefficient of variation Cv, %	Индекс самофертильности, $И_{сф}$, (Н) | Self-fertility index I_{sf}, (Н)
Берёза повислая | Silver birch						
С-36 | S-36	6 9	Со | Sp Св | Op	5,12 ± 0,43 3,90 ±1,53	1,0 2,7	20 68	1,31
С-54 | S-54	11 15	Со | Св |	5,79 ± 0,65 2,18 ± 0,47	2,1 1,2	54 53	2,56
Берёза пушистая | Downy birch						
Б-11 | B-11	5 5	Со | Св |	6,56 ± 0,10 4,33 ± 0,24	0,2 0,5	13 11	1,52
Б-14 | B-14	11 12	Со | Св |	4,95 ± 0,48 3,78 ± 0,35	1,5 1,2	31 52	1,31

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculation

В ходе исследования были использованы листья березы с укороченных побегов, так как они обладают большей генетической детерминированностью. Возраст деревьев составлял 21 год. Было проведено измерение следующих двусторонних характеристик листовых пластинок (л. пл.): 1. Ширина половины л.пл.; 2. Длина 2-й жилки л.пл.; 3. Расстояние между основаниями 1-й и 2-й жилок; 4. Расстояние между окончаниями 1-й и 2-й жилок. Рассчитывали величину асимметрии по каждому признаку для всех листьев по формуле X = |L-R| / |L+R|, абсолютную разность левой и правой стороны делили на их сумму. Для каждого дерева составляли отдельную таблицу. Была рассчитана величина асимметрии у двух контрастных по уровню самофертильности деревьев берёзы пушистой семенного происхождения. Предварительно выборки листовых пластинок изучаемых генотипов были тестированы на нормальность распределения изучаемого признака (длина листовой пластинки).

Таблица 2

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-11 св 39-28

Table 2

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-11 op 39-28

Номер листа | Leaf No.	Номер признака | Feature number				Величина асимметрии листа | The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,15
2	0,2	0,2	0	0	0,1
3	0	0,3	0	0	0,075
4	0	0,1	0	0,2	0,075
5	0	0,2	0,2	0,1	0,125
6	0,2	0,2	0,1	0,4	0,225
7	0,2	0,1	0	0,1	0,1
8	0	0	0	0,2	0,05
9	0,2	0,4	0	0	0,15
10	0,3	0,2	0	0,5	0,25
11	0	0,2	0	0,3	0,125
12	0,3	0,5	0	0,1	0,225
13	0,2	0	0,1	0	0,075
14	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2
15	0,1	0,1	0,1	0	0,075
Величина асимметрии в выборке | The amount of asymmetry in the sample					$X_{ср}$= 0,133

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculation

Таблица 3

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-14 со 37-9

Table 3

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-14 sp with 37-9

Номер листа | Leaf No.	Номер признака | Feature number				Величина асимметрии листа | The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,175
2	0	0	0	0,7	0,175
3	0	0	0,3	0	0,075
4	0	0,1	0	0,3	0,1
5	0,3	0,1	0	0,1	0,125
6	0,1	0,2	0,2	0,1	0,15
7	0,2	0,3	0	0	0,125
8	0,1	0,3	0	0	0,1
9	0,2	0,2	0	0,8	0,3
10	0,2	0,2	0	0	0,1
11	0,2	0	0,1	0	0,075
12	0,3	0	0,1	0	0,1
13	0,1	0,2	0,2	0	0,125
14	0,1	0,1	0,2	0	0,1
15	0,1	0,1	0,3	0	0,125
Величина асимметрии в выборке | The amount of asymmetry in the sample					$X_{ср}$= 0,13

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 4

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-11 св 39-27

Table 4

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-11 op 39-27

Номер листа | Leaf No.	Номер признака | Feature number				Величина асимметрии листа | The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,25
2	0,3	0	0,1	0,2	0,15
3	0,2	0,1	0	0,3	0,15
4	0,3	0,4	0	0	0,175
5	0,2	0,1	0	0	0,75
6	0,2	0,1	0	0	0,75
7	0,1	0,2	0	0,3	0,15
8	0,1	0,1	0,1	0,2	0,125
9	0	0	0	0,3	0,75
10	0,1	0,1	0,1	0,3	0,15
11	0,1	0	0	0	0,025
12	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
13	0,1	0,1	0	0,1	0,75
14	0,1	0,2	0	0,3	0,15
15	0	0,2	0	0	0,05
Величина асимметрии в выборке | The amount of asymmetry in the sample					$X_{ср}$= 0,305

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 5

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-14 со 37-8

Table 5

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-14 sp 37-8

Номер листа | Leaf No.	Номер признака | Feature number				Величина асимметрии листа | The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,125
2	0,3	0,9	0,2	0,2	0,4
3	0,1	0,1	0	0,2	0,1
4	0,1	0,5	0	0,2	0,2
5	0,2	0	0	0	0,05
6	0,1	0,3	0,1	0	0,125
7	0,1	0,5	0,2	0	0,2
8	0,1	0,1	0	0	0,05
9	0,1	0,5	0	0,1	0,175
10	0,1	0,5	0,2	0	0,2
11	0	0,1	0,2	0	0,075
12	0,1	0	0	0	0,025
13	0	0,2	0,2	0	0,1
14	0,2	0	0	0,1	0,075
15	0,2	0	0	0,2	0,1
Величина асимметрии в выборке | The amount of asymmetry in the sample					$X_{ср}$= 0,133

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculation

Ниже приводятся баллы и величины показателя стабильности развития длины листовой пластинки берёзы, определяемую для флуктуирующей асимметрии (Методические рекомендации … 2003 [35]). I балл < 0,040; II балла - 0,040-0,044; III балла - 0,045-0,049; IV балла 0,050-0,054; V баллов > 0,054, где римская цифра (I - V) это стабильность развития в баллах, цифровые показатели – оценка качества среды (I – условно нормальное, II – начальные (незначительные) отклонения от нормы, III – средний уровень отклонения от нормы, IV – существенные (значительные) отклонения от нормы, V – критическое состояние.

Результаты и обсуждение

Показатель стабильности развития. Показатель определялся у 4-х селекционных форм берёзы пушистой: у формы Б-11, 2 дерева от свободного опыления (39-27 и 39-28); у формы Б-14, 2 дерева от самоопыления; отобрали и проанализировали по 15 листьев с каждого дерева (таблицы 2-5).

На данном растительном материале проведён однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), в котором группирующим фактором служил система размножения дерева, а откликом – длина листовой пластинки. Результат проведения показан на рисунке 1 и таблице 6.

Из рисунка 1 видно, что выборки листовых пластинок трех деревьев, полученных при разных способах опыления (Б-11 св 39-28, Б-11 св 39-27 и Б-14 со 37-8) показали типичный характер для графика box plot, с медианными значениями и данными, не выходящими за пределы диапазона. Однако выборка листьев самоопыленного дерева Б-14 со с индексом 37-9 показала отсутствие структуры распределения классического количественного признака. Это указывает на то, что при самоопылении проявляются процессы, увеличивающие нестабильность развития отдельных признаков вегетативных органов (листовой пластинки, а именно, её длины) берёзы пушистой. Это может быть связано с полиплоидным состоянием данного вида древесных растений. Тьюки HSD – тест используется после дисперсионного анализа для оценки достоверных различий средних значений признаков, в таблице – для признака «длина листовой пластинки». Красным выделены достоверные различия между селекционными формами при $p < 0,05$. Гистограмма распределения указанного признака среди всех форм пушистой берёзы показала нормальное распределение.

Происхождение растительного материала. Сформированные листья с листовыми пластинками были собраны с деревьев следующего генетического происхождения. Самофертильные формы С-36 и С-54 – инбредного и аутбредного происхождения. Количество тестированных листьев – 15.

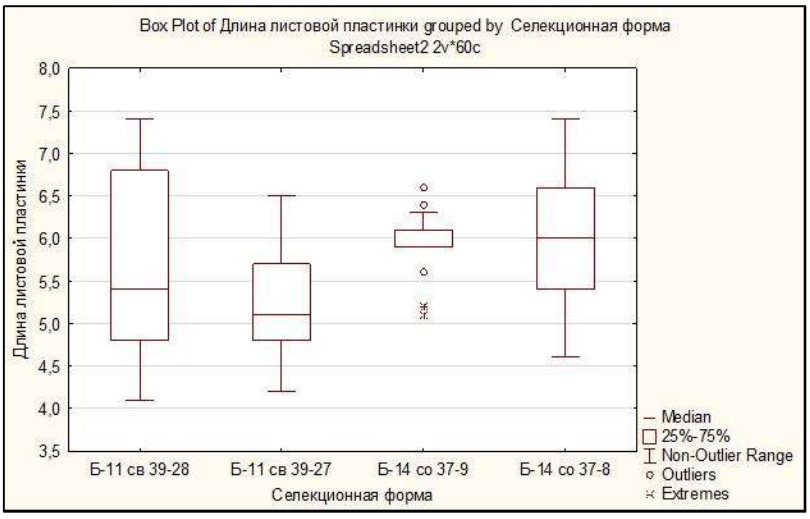


Рисунок 1. Вариабельность длины листовой пластинки у высокосамофертильных форм берёзы пушистой при алло- (Б-11) и аутогамии (Б-14)

Figure 1. Variability of leaf blade length in highly self-fertile forms of downy birch during allo- (B-11) and autogamy (B-14)
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таблица 6
Тьюки HSD - тест по семьям берёзы пушистой высокосамофертильных форм при алло- (Б-11) и аутогамии (Б-14)

Table 6
Tukey HSD test on families of downy birch of highly self-fertile forms with allo- (B-11) and autogamy (B-14)

Селекционная форма | Breeding forms	Tukey HSD test; Variable: Длина листовой пластинки (Spreadsheet2) Marked differences are significant at p < ,05000			
	{1} M=5,7000	{2} M=5,1867	{3} M=5,9800	{4} M=5,9800
Б-11 св 39-28 {1}		0,295818	0,767869	0,767869
Б-11 св 39-27 {2}	0,295818		0,039603	0,039603
Б-14 со 37-9 {3}	0,767869	0,039603		1,000000
Б-14 со 37-8 {4}	0,767869	0,039603	1,000000	

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

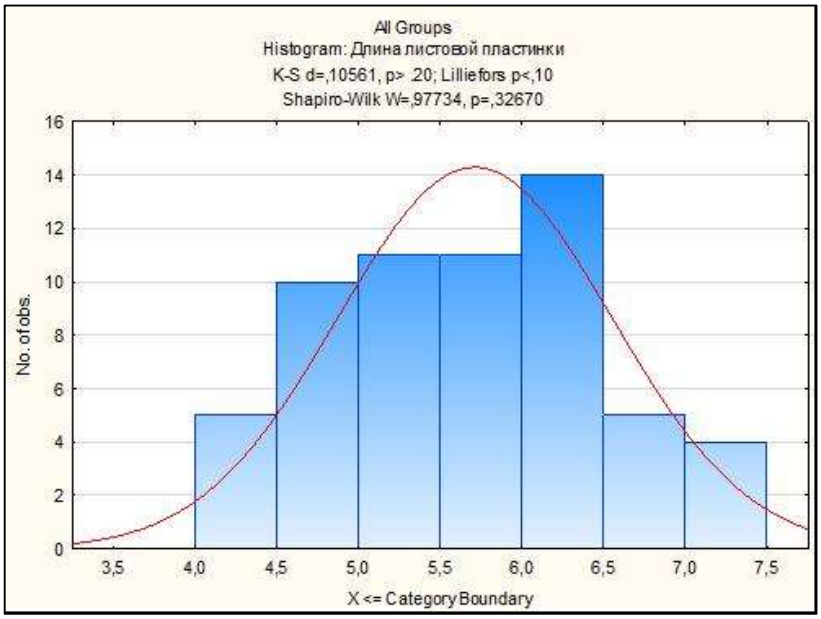


Рисунок 2. Гистограмма распределения нормальности признака между всеми формами берёзы пушистой

Figure 2. Histogram of the distribution of normality of the feature between all forms of downy birch

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

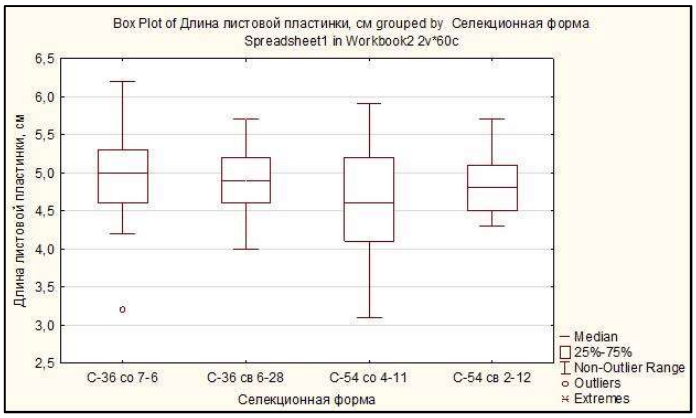


Рисунок 3. Вариабельность длины листовой пластинки у высокосамофертильных форм берёзы повислой при алло- (С-36 св, С-54 св) и аутогамии (С-36 со, С-54 со)

Figure 3. Variability of leaf blade length in highly self-fertile forms of silver birch in allo- (C-36 op, C-54 op) and autogamy (C-36 sp, C-54 sp)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

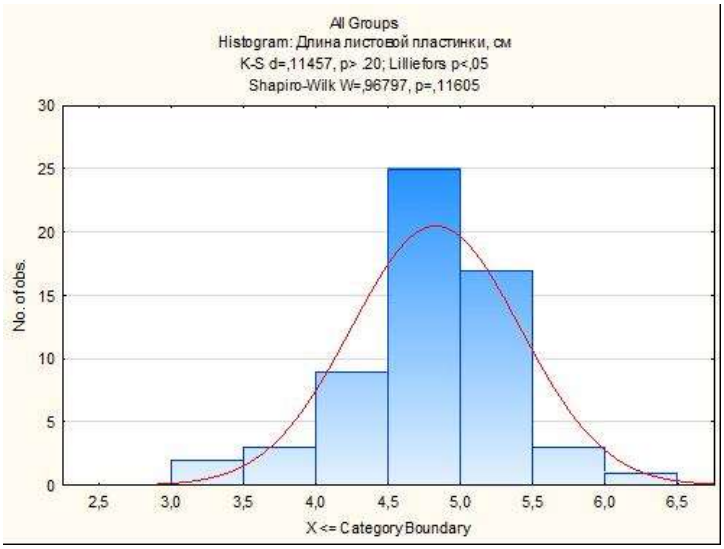


Рисунок 4. Гистограмма распределения нормальности признака между всеми формами берёзы повислой

Figure 4. Histogram of the distribution of the normality of the feature between all forms of silver birch

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таблица 7

Тьюки HSD - тест по семьям берёзы повислой высокосамофертильных форм при алло- и аутогамии, С-36 и С-54

Table 7

Tukey HSD test on families of silver birch of highly self-fertile forms in allo- and autogamy, C-36 and C-54

	Tukey HSD test; Variable: Длина листовой пластинки, см (Spreadsheet1 in Workbook2) Marked differences are significant at p < ,05000			
Селекционная форма | Breeding forms	{1} M=4,9533	{2} M=4,8933	{3} M=4,6267	{4} M=4,8400

С-36 со 7-6 {1}		0,992280	0,428371	0,951525
С-36 св 6-28 {2}	0,992280		0,600204	0,994564
С-54 со 4-11 {3}	0,428371	0,600204		0,751524
С-54 св 2-12 {4}	0,951525	0,994564	0,751524	

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Иной характер показателей изменчивости листовой пластинки проявляется у берёзы повислой (рис. 5). Достоверных различий на общем графике у всех высокосамофертильных форм при аллогамии и аутогамии не обнаружено (Таблица 7). Обе изучаемые семьи (С-36 и С-54) имеют примерно равные средние значения признака при разных способах опыления (4,95; 4,89; 4,62 и 4,84, соответственно). Наблюдаем небольшое снижение по сравнению с остальными у инбредной семьи С-54. У неё же и наибольшая изменчивость признака (от 3,2 см до 5,9 см). Статистически достоверные отличия ($p < 0,05$) не выявлены между инбредными и аутбредными семьями.

Заключение

Результаты работы позволяют говорить о вариабельности критериев оценки состояния окружающей среды у двух произрастающих в Воронежской области видов берёз – берёзы повислой и берёзы пушистой. Стабильность развития у берёзы пушистой по морфологическим признакам, независимо от системы размножения вида, не укладывается в традиционные рамки представления как вида – идентификатора состояния окружающей среды. Это свидетельствует о большем влиянии генотипа растения в системе взаимодействия генотип-среда на изучаемый признак. Кроме того, полиплоидный вид берёзы (берёза пушистая, 2n=4x=56) показывает превышение стандартного значения (экспериментальное значение 0,305; V класс оценки (критическое состояние окружающей среды) - 0,054). Таким образом полиплоидные виды деревьев могут реагировать в нормальных условиях среды, без антропогенной нагрузки, высоким уровнем морфологической изменчивости. Это может быть связано с эволюционным фенотипическим разнообразием, которое позволяет полиплоидному (тетраплоидному) виду приспособиться новым экологическим нишам или суровым условиям произрастания, а также позволяет иметь более высокий адаптивный потенциал и селекционную значимость по сравнению с диплоидными видами. В свете полученных данных предлагается ограничить использование индекса ФА при оценке качества окружающей среды для гибридов, селекционных и мутантных форм в роде Берёза. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что длина листовой пластинки у высокосамофертильных форм берёзы пушистой достоверно различается при разных способах опыления, это может говорить о разных общих площадях листовой поверхности у этих селекционных форм. Длина листовых пластинок у берёзы пушистой при разных способах опыления незначительно превышала таковую у берёзы повислой аналогичного происхождения. В целом статистически подтверждена фенотипическая нестабильность вегетативных органов (на примере листовой пластинки) у полиплоидного вида берёзы по сравнению с диплоидным.

Список литературы

1. Smith S. W., Cavers S., Diez E. et al. Species, genes and epigenetics: how dimensions of diversity interact for forest resilience. Quarterly Journal of Forestry. 2025; 119(4): 241-248.
2. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. ScienceAsia. 2019; 45: 203-211. DOI: 10.2306/scienceasia.

3. Ashburner K., McAllister H. A. The Genus Betula: A Taxonomic Revision of Birches. London: Kew Publishing, 2016. 21 p.
4. Zhang H., Ding J., Holstein N. et al. Betula mcallisteri sp. nov (sect. Acuminatae, Betulaceae), a new diploid species overlooked in the wild and in cultivation, and its relation to the widespread B. luminifera. Front. Plant Sci. 2023; 14: 1113274. DOI: 10.3389/fpls.2023.1113274.
5. Aihara T., Araki K., Tsumura Y. Cryptic diploid lineage of Betula ermanii at its southern boundary populations in Japan. PLoS ONE. 2024; 19(7): e0307023. DOI: 10.1371/journal.pone.0307023.
6. Brun Usan M., Nunes-da-Fonseca R., Kavanagh K.D. et al. Eco-evo-devo: an emergent integrative discipline of biology. Front. Cell Dev. Biol. 2025; 13: 1681036. DOI: 10.3389/fcell.2025.1681036.
7. Vanadzina K., Street S. E., Healy S.D. et al. Global drivers of variation in cup nest size in passerine birds. Journal of Animal Ecology. 2023; 92: 338-351. DOI: 10.1111/1365-2656.13815.
8. Nemati S., Singh A., Dhuey S.D. et al. Density fluctuations, homeostasis, and reproduction effects in bacteria. Communications Biology. 2022; 5(1): 397.
9. Steinberg S., Grinberg M., Beitelman M. et al. Two-way microscale interactions between immigrant bacteria and plant leaf microbiota as revealed by live imaging. The ISME Journal. 2020: 409-420. DOI: 10.1038/s41396-020-00767-z.
10. Szilágyi A., Szabó P., Santos M., Szathmáry E. Phenotypes to remember: Evolutionary developmental memory capacity and robustness. PLoS Comput Biol. 2020; 16(11): e1008425. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1008425.
11. Kirschner M. W., Gerhart J. C. The Plausibility of Life: Resolving Darwin's Dilemma. Yale University Press, 2020. 336 p.
12. Carleial R., Charters M., Finzgar D., Swift P. et al. Genetic basis of traits and local adaptation in UK silver birch. bioRxiv. 2025: 38 p. DOI: 10.1101/2025.07.04.662749.
13. Корона В.В., Васильев А.Г. Строение и изменчивость листьев растений: Основы модульной теории. – 2-е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 280 с.
14. Сапельникова И.И. Оценка многолетних фенологических данных некоторых древесно-кустарниковых видов в Воронежском заповеднике // Труды Воронежского государственного заповедника. – 2023. – Вып. XXXI. – С. 174-228.
15. Rodríguez-Castilla G., Carpio A. J., Bastias C. C. et al. Leaf functional traits as browsing indicators in understory woody species of Mediterranean forests. Forest Ecology and Management. 2025; 598: 1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2025.123230.
16. Hamann E., Pauli C., Joly-Lopez Z. et al. Rapid evolutionary changes in gene expression in response to climate fluctuations. Molecular Ecology. 2020; 30(1): 193-206. DOI: 10.1111/mec.15583.
17. Seppälä J., Heinonen T., Pukkala T. et al. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. Journal of environmental management. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.031.
18. Poorter H., Niinemets U., Ntagkas N. et al. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance. New Phytologist. 2019; 223: 1073-1105. DOI: 10.1111/nph.15754.
19. Мигалина С. В., Калашникова И. В. Структура мезофилла листа и биомасса берез из разных природно-климатических зон Северной Евразии // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 221-224.
20. Юдина П. К., Иванов Л. А., Ронжина Д. А. и др. Влияние систематического положения на уровне семейства на функциональные черты листьев степных растений // Сибирский экологический журнал. – 2020. – № 5. – С. 647-661. – DOI: 10.15372/SEJ20200508.
21. Whiting J. R., Booker T. R., Rougeux C. et al. The genetic architecture of repeated local adaptation to climate in distantly related plants. Nature Ecology & Evolution. 2024; 8: 1933-1947. DOI: 10.1038/s41559-024-02514-5.
22. Ray D., Berlin M., Alia R. et al. Transformative changes in tree breeding for resilient forest restoration. Front. For. Glob. Change. 2022; 5: 1005761. DOI: 10.3389/ffgc.2022.1005761.
23. Huang Z., Fu C., Li C. et al. Distributional Responses of Five Betula (Betulaceae) Species to Future Climate Change in China. Forests. 2025; 16(3): 400. DOI: 10.3390/f16030400.
24. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Thórsson Æ. et al. Microscopical palynology: Birch woodland expansion and species

hybridisation coincide with periods of climate warming during the Holocene epoch in Iceland. Journal of Microscopy. 2023; 291(1): 128-141. DOI: 10.1111/jmi.13175.

25. Xu W., Chen S., Jiang J. et al. Expression profiling of the BpIAA gene family and the determination of IAA levels in Betula platyphylla tetraploids. J. For. Res. 2019; 30: 855-867. DOI: 10.1007/s11676-018-0670-1.
26. Hou J., Liu M., Yang K. et al. Genetic variation for adaptive evolution in response to changed environments in plants. J. Integr. Plant Biol. 2025; 67: 2265-2293.
27. Козлов М.В. Исследования флуктуирующей асимметрии растений в России: мифология и методология // Экология. – 2017. – № 1. – С. 3-12. – DOI: 10.7868/S0367059717010103.
28. Опекунова М. Г. Сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды в Санкт-Петербурге // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2023. – Т. 68, № 2. – DOI: 10.21638/spbu07.2023.207.
29. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). – М.: Мин-во природных ресурсов РФ, гос. служба охраны ООС (Росэкология), 2003. – 25 с.
30. Leal J.L., Milesi P., Hodková E. et al. Complex Polyploids: Origins, Genomic Composition, and Role of Introgressed Alleles. Syst Biol. 2024; 73(2): 392-418. DOI: 10.1093/sysbio/syae012.
31. Исаков И.Ю., Шестибратов К.А. Фенотипическая пластичность и селекционно-репродуктивные особенности биоресурсной коллекции рода Betula L. в Воронежской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025; 252: 260-277. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.260-277.
32. Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю. Оценка здоровья среды по величине флуктуирующей асимметрии древесных растений: анализ возможных причин искажения результатов // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2023; 7: 29-38. DOI: 10.31857/S1026347023600243.

References

1. Smith S. W., Cavers S., Diez E. et al. Species, genes and epigenetics: how dimensions of diversity interact for forest resilience. Quarterly Journal of Forestry. 2025;119(4):241-248.
2. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. ScienceAsia. 2019;45:203-211. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2019.45.203.
3. Ashburner K., McAllister H. A. The Genus Betula: A Taxonomic Revision of Birches. London: Kew Publishing; 2016. 431 p.
4. Zhang H., Ding J., Holstein N. et al. Betula mcallisteri sp. nov (sect. Acuminatae, Betulaceae), a new diploid species overlooked in the wild and in cultivation, and its relation to the widespread B. luminifera. Frontiers in Plant Science. 2023;14:1113274. DOI: 10.3389/fpls.2023.1113274.
5. Aihara T., Araki K., Tsumura Y. Cryptic diploid lineage of Betula ermanii at its southern boundary populations in Japan. PLoS ONE. 2024;19(7):e0307023. DOI: 10.1371/journal.pone.0307023.
6. Brun Usan M., Nunes-da-Fonseca R., Kavanagh K. D. et al. Eco-evo-devo: an emergent integrative discipline of biology. Frontiers in Cell and Developmental Biology. 2025;13:1681036. DOI: 10.3389/fcell.2025.1681036.
7. Vanadzina K., Street S. E., Healy S. D. et al. Global drivers of variation in cup nest size in passerine birds. Journal of Animal Ecology. 2023;92:338-351. DOI: 10.1111/1365-2656.13815.
8. Nemati S., Singh A., Dhuey S. D. et al. Density fluctuations, homeostasis, and reproduction effects in bacteria. Communications Biology. 2022;5:397. DOI: 10.1038/s42003-022-03353-5.
9. Steinberg S., Grinberg M., Beitelman M. et al. Two-way microscale interactions between immigrant bacteria and plant leaf microbiota as revealed by live imaging. The ISME Journal. 2020;14:409-420. DOI: 10.1038/s41396-020-00767-z.
10. Szilágyi A., Szabó P., Santos M., Szathmáry E. Phenotypes to remember: Evolutionary developmental memory capacity and robustness. PLoS Computational Biology. 2020;16(11):e1008425. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1008425.

11. Kirschner M. W., Gerhart J. C. The Plausibility of Life: Resolving Darwin's Dilemma. New Haven: Yale University Press; 2020. 336 p.
12. Carleial R., Charters M., Finzgar D., Swift P. et al. Genetic basis of traits and local adaptation in UK silver birch. bioRxiv. 2025;38 p. DOI: 10.1101/2025.07.04.662749.
13. Korona V. V., Vasil'ev A. G. Stroenie i izmenchivost' list'ev rasteniy: Osnovy modul'noy teorii [Structure and variability of plant leaves: Fundamentals of modular theory]. 2nd ed. Yekaterinburg: UrO RAN; 2007. 280 p. (In Russ.).
14. Sapel'nikova I. I. Otsenka mnogoletnikh fenologicheskikh dannykh nekotorykh drevesno-kustarnikovykh vidov v Voronezhskom zapovednike [Assessment of long-term phenological data of some tree and shrub species in the Voronezh Reserve]. Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo zapovednika = Proceedings of the Voronezh State Reserve. 2023;XXXI:174-228. (In Russ.).
15. Rodríguez-Castilla G., Carpio A. J., Bastias C. C. et al. Leaf functional traits as browsing indicators in understory woody species of Mediterranean forests. Forest Ecology and Management. 2025;598:1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2025.123230.
16. Hamann E., Pauli C., Joly-Lopez Z. et al. Rapid evolutionary changes in gene expression in response to climate fluctuations. Molecular Ecology. 2020;30(1):193-206. DOI: 10.1111/mec.15583.
17. Seppälä J., Heinonen T., Pukkala T. et al. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. Journal of Environmental Management. 2019;241:587-597. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.031.
18. Poorter H., Niinemets Ü., Ntagkas N. et al. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance. New Phytologist. 2019;223:1073-1105. DOI: 10.1111/nph.15754.
19. Migalina S. V., Kalashnikova I. V. Struktura mezofilla lista i biomassa berez iz raznykh prirodno-klimaticheskikh zon Severnoy Evrazii [Leaf mesophyll structure and biomass of birches from different natural and climatic zones of Northern Eurasia]. Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii = Problems of Botany of South Siberia and Mongolia. 2023;22(1):221-224. (In Russ.).
20. Yudina P. K., Ivanov L. A., Ronzhina D. A. i dr. Vliyanie sistemnogo polozheniya na urovne semejstva na funkcional'nye cherty list'ev stepnyh rastenij [Influence of systematic position at the family level on functional traits of steppe plant leaves]. Sibirskij ekologicheskij zhurnal = Siberian Ecological Journal. 2020;5:647-661. (In Russ.). DOI: 10.15372/SEJ20200508.
21. Whiting J. R., Booker T. R., Rougeux C. et al. The genetic architecture of repeated local adaptation to climate in distantly related plants. Nature Ecology & Evolution. 2024;8:1933-1947. DOI: 10.1038/s41559-024-02514-5.
22. Ray D., Berlin M., Alia R. et al. Transformative changes in tree breeding for resilient forest restoration. Frontiers in Forests and Global Change. 2022;5:1005761. DOI: 10.3389/ffgc.2022.1005761.
23. Huang Z., Fu C., Li C., Yang X. et al. Distributional Responses of Five Betula (Betulaceae) Species to Future Climate Change in China. Forests. 2025;16:400. DOI: 10.3390/f16030400.
24. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Thórsson Æ. et al. Microscopical palynology: Birch woodland expansion and species hybridisation coincide with periods of climate warming during the Holocene epoch in Iceland. Journal of Microscopy. 2023;291(1):128-141. DOI: 10.1111/jmi.13175.
25. Xu W., Chen S., Jiang J. et al. Expression profiling of the BpIAA gene family and the determination of IAA levels in Betula platyphylla tetraploids. Journal of Forestry Research. 2019;30:855-867. DOI: 10.1007/s11676-018-0670-1.
26. Hou J., Liu M., Yang K. et al. Genetic variation for adaptive evolution in response to changed environments in plants. Journal of Integrative Plant Biology. 2025;67:2265-2293.
27. Kozlov M. V. Issledovaniya fluktuiruyushchej asimmetrii rastenij v Rossii: mifologiya i metodologiya [Studies of fluctuating asymmetry of plants in Russia: mythology and methodology]. Ekologiya = Russian Journal of Ecology. 2017;1:3-12. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0367059717010103.

28. Opekunova M. G. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti metodov bioindikacii pri monitoringovyh issledovaniyah sostoyaniya okruzhayushchej sredy v Sankt-Peterburge [Comparative analysis of the effectiveness of bioindication methods in monitoring studies of the environmental condition in St. Petersburg]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2023;68(2). (In Russ.). DOI: 10.21638/spbu07.2023.207.
29. Metodicheskie rekomendacii po vypolneniyu ocenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivyh sushchestv (ocenka stabil'nosti razvitiya zhivyh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskih struktur) [Guidelines for environmental quality assessment based on the state of living beings (assessment of the developmental stability of living organisms by the level of morphological structure asymmetry)]. Moscow: Min-vo prirodnyh resursov RF, gos. sluzhba ohrany OOS (Rosekologiya); 2003. 25 p. (In Russ.).
30. Leal J. L., Milesi P., Hodková E. et al. Complex Polyploids: Origins, Genomic Composition, and Role of Introgressed Alleles. Systematic Biology. 2024;73(2):392-418. DOI: 10.1093/sysbio/syae012.
31. Isakov I. Yu., Shestibratov K. A. Fenotipicheskaya plastichnost' i selekcionno-reproduktivnye osobennosti bioresursnoj kollekcii roda Betula L. v Voronezhskoj oblasti [Phenotypic plasticity and selection-reproductive features of the bioresource collection of the genus Betula L. in the Voronezh region]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii = Bulletin of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2025;252:260-277. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.260-277.
32. Shadrina E. G., Soldatova V. Yu. Ocenka zdorov'ya sredy po velichine fluktuiruyushchej asimmetrii drevesnyh rastenij: analiz vozmozhnyh prichin iskazheniya rezul'tatov [Assessment of environmental health by the value of fluctuating asymmetry of woody plants: analysis of possible causes of result distortion]. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya biologicheskaya = Biology Bulletin. 2023;7:29-38. (In Russ.). DOI: 10.31857/S1026347023600243.

Сведения об авторах

✉ *Исаков Игорь Юрьевич* – доктор с.-х. наук, профессор кафедры лесной генетики, биотехнологии и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2927-3275, e-mail: labgen@vglta.vrn.ru

Шестибратов Константин Александрович – кандидат биологических наук, руководитель группы лесной биотехнологии Филиала ГНЦ ИБХ РАН, Проспект Науки 6, г. Пущино, Российская Федерация., ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1996-6433, e-mail: schestibratov.k@yandex.ru

Information about the authors

✉ *Igor Yu. Isakov* – Professor of the Department of Forest Genetics, Biotechnology and Physiology of Plants, Doctor of Agricultural Sciences, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,394087, Voronezh, Russian Federation

Konstantin A. Shestibratov – Head of forest biotechnology group, PhD, Branch of the Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 142290, Pushchino, Russian Federation

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/8
УДК 630* 712.2:374.7 (470.317)

Современное состояние зеленых насаждений Кологривского зоотехнического техникума (Костромская область)

Александр В. Лебедев[1, 2]✉, alebedev@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0002-8939-942X

[1]*ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация*

[2]*ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кологривский лес» имени М.Г. Синицына», ул. Некрасова, 48, г. Кологрив, Костромская обл., 157440, Российская Федерация*

Для эффективного вовлечения объектов культурного наследия в туристическую сферу, сохранения исторической памяти, проведения комплексных реставрационных работ особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление ассортимента растений, пространственно-планировочной структуры зеленых насаждений и оценку их современного состояния. Цель исследования – оценка современного состояния зеленых насаждений на территории бывшего Кологривского низшего сельскохозяйственного технического училища имени Ф.В. Чижова (Костромская область). В исследовании применялся комплекс методов: историко-архивный анализ, натурные обследования и графоаналитический метод. В ходе полевых исследований 2023-2025 годов проведена инвентаризация зеленых насаждений, оценка их санитарного состояния, изучен видовой состав подпологовых растений. Выявлена сложная пространственно-планировочная структура территории, включающая липовую аллею и пейзажный парк с фрагментами регулярной планировки и деревьями, возраст которых достигает 180-190 лет. Древесные насаждения находятся в ослабленном состоянии, а доля усыхающих и сухостойных деревьев достигает 26% в аллее и 35% в парке. Под пологом парка отмечено успешное естественное возобновление липы и вяза. В целом в ближайшие десятилетия прогнозируется снижению биоразнообразия и угроза утраты сохранившегося исторического ассортимента древесно-кустарниковых растений. Широкое распространение борщевика Сосновского на территории комплекса и использование химического метода борьбы с ним создает угрозу физической утраты паркового ландшафта. Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о необходимости разработки и реализации комплекса консервационных и реставрационных мероприятий, в том числе лесоводственных по уходу за насаждениями и улучшению их санитарного состояния. Результаты исследования являются научной основой для разработки мероприятий по сохранению и восстановлению не только данного объекта, но и других провинциальных исторических парков центральной России, находящихся в схожем состоянии.

Ключевые слова: *исторические ландшафты, зеленые насаждения, объект культурного наследия*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.
Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.
Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лебедев А.В. Современное состояние зеленых насаждений Кологривского зоотехнического техникума (Костромская область) / А.В. Лебедев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. *125-145. – Библиогр.: с. 140-144 (33 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/8.

Поступила 17.09.2025. ***Пересмотрена*** 21.10.2025. ***Принята*** 30.10.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Current state of green spaces of the Kologriv zootechnical technical school (Kostroma region)

Aleksandr V. Lebedev[1, 2]✉, alebedev@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0002-8939-942X

[1]*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, 127434, Russian Federation*

[2]*Kologrivsky Forest Nature Reserve, Nekrasova st., 48, Kologriv town, Kostroma region, 157440, Russian Federation*

Abstract

For the effective involvement of cultural heritage sites in the tourism sector, the preservation of historical memory, and the implementation of comprehensive restoration work, studies aimed at identifying the range of plants, the spatial-planning structure of green spaces and assessing their current state are of particular relevance. The purpose of the study is to assess the current state of green spaces on the territory of the former Kologrivsky Lower Agricultural Technical School named after F.V. Chizhov (Kostroma Region). The study used a set of methods: historical and archival analysis, field surveys and a graphoanalytical method. During field studies in 2023-2025, an inventory of green spaces was carried out, their sanitary condition was assessed, and the species composition of undercanopy plants was studied. A complex spatial-planning structure of the territory was revealed, including a linden alley and a landscape park with fragments of regular planning and trees aged 180-190 years. The tree plantations are in a weakened state, and the share of drying and dead trees reaches 26% in the alley and 35% in the park. Successful natural regeneration of linden and elm is noted under the canopy of the park. In general, a decrease in biodiversity and a threat of losing the preserved historical assortment of trees and shrubs are predicted in the coming decades. The widespread distribution of Sosnowsky's hogweed on the territory of the complex and the use of chemical methods of controlling it create a threat of physical loss of the park landscape. The results obtained in the course of the study indicate the need to develop and implement a set of conservation and restoration measures, including forestry ones for the care of plantations and improving their sanitary condition. The study results form a scientific foundation for developing preservation and restoration measures, applicable not only to this particular object but also to other provincial historical parks in central Russia facing similar conditions.

Keywords: *historical landscapes, green spaces, cultural heritage site*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: author thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

For citation: Lebedev A.V. (2025). Current state of green spaces of the Kologriv zootechnical technical school (Kostroma region). Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 125-145 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/8.

Received 17.09.2025. ***Revised*** 21.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Исторические ландшафты отражают разнообразные социальные, экономические и политические преобразования, формируют идентичность городских и сельских территорий, которая нуждается в сохранении для будущих поколений [1, 2]. Часто их неотъемлемой частью являются старинные парки, аллеи, групповые

посадки деревьев, солитеры, обеспечивающие широкий спектр экосистемных услуг [3, 4, 5]. Они выполняют разнообразные экологические функции, определяют самобытность ландшафта, формируют культурную ценность и туристко-рекреационный потенциал территорий [6, 7].

Основы по сохранению и восстановлению объектов садово-паркового искусства, содержанию лесопарковых территорий рассмотрены в работах В.А. Агальцовой [8], Н.Н. Гусева с соавт. [9], А.П. Вергунова и В.А. Горохова [10] и др. В России в последние годы возрастает интерес к изучению исторического озеленения, рассматриваются проблемы его сохранения и использования в современных условиях [11-15]. К настоящему времени накоплено много сведений об объектах садово-паркового строительства крупных усадебных и дворцово-парковых комплексов, имеющих общероссийское и мировое значение. Как правило, они расположены в крупных городских агломерациях или связаны с жизнью выдающихся государственных и военных деятелей, ученых, художников, писателей, меценатов [16-19]. Однако не меньший интерес представляют провинциальные исторические объекты садово-паркового строительства [20-22].

Одним из регионов центральной России, обладающим значительным историко-культурным и природным потенциалом, является Костромская область, на территории которой расположено множество малоизвестных и находящихся в запустении объектов садово-паркового строительства. Повышению эффективности использования этих территорий может способствовать реализуемая в регионе «Стратегия развития туризма в Костромской области на период до 2035 года». Она, в частности, предполагает разработку новых туристических маршрутов, развитие туристской инфраструктуры, повышение доступности информации о малоизвестных местах. Также в настоящее время стоит отметить работу АНО «Галицкая провинция» в девяти районах северо-запада области, направленную на развитие потенциала территорий и людей, создание комфортной среды.

Интересным объектом в Костромской области с точки зрения истории и архитектурно-планировочных решений является территория бывшего Кологривского низшего сельскохозяйственного технического училища имени Ф.В. Чижова, которое ведет свою историю с конца XIX века, а сохранившиеся фрагменты усадебных парковых насаждений достигают возраста 180-190 лет. В литературе [23, 24] делается акцент, главным образом, на архитектурных особенностях кампуса, а имеющиеся сведения об садово-парковом комплексе продолжают оставаться весьма ограниченными. Для эффективного вовлечения объекта в туристическую сферу, сохранения исторической памяти, проведения комплексных реставрационных работ особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление ассортимента растений, пространственно-планировочной структуры зеленых насаждений и оценку их современного состояния.

Цель исследования – оценка современного состояния зеленых насаждений на территории бывшего Кологривского низшего сельскохозяйственного технического училища имени Ф.В. Чижова (Костромская область).

Материалы и методы

Объект исследования. Бывшее Кологривское низшее сельскохозяйственное техническое училище имени Ф.В. Чижова расположено на территории поселка Екимцево Кологривского муниципального округа Костромской области (N58.827922, E44.258515, WGS 84). Район исследования характеризуется умеренно-континентальным климатом с преобладанием осадков над испарением, с коротким сравниельно теплым летом и холодной многоснежной зимой. Преобладающими почвами являются дерново-подзолистые и подзолистые с кислой реакцией и низкой обеспеченностью питательными элементами. Согласно ботанико-географическому районированию территория относится к подзоне южной тайги [25].

Историческая справка. По сохранившимся в архивах историческим документам сельцо Екимцево (Якимцево) известно с 1616 года, когда в

нем насчитывалось четыре крестьянских двора. В 1647 году Екимцево числилось за московским дьяком Е.Г. Бегичевым. В середине XVIII века здесь была усадьба кологривского воеводы Д.И. Ларионова [23], которая состояла из деревянного господского дома и небольшой винокурни. В первой четверти XIX века владелицей Екимцева была А.В. Перфильева, в замужестве Ешевская, а в 1829 году здесь родился будущий известный русский историк, профессор С.В. Ешевский. В 1840 году владельцем усадьбы был Г.В. Шулепников, в 1879 году – А.К. Поливанов. В конце 1880-ых годов усадьба была продана для создания училища [24].

В конце 1887 года начались подготовительные работы к строительству Низшего сельскохозяйственно-технического училища на средства, оставленные по завещанию Ф.В. Чижовым. В 1892 году состоялось открытие передового для своего времени учебного заведения в российской глубинке с водопроводом, центральным отоплением, электроосвещением. Отмечается, что учебное заведение считалось одним из лучших техническим училищем в дореволюционной России [26]. Двухэтажный кирпичный учебный корпус, напоминающий готический замок, возведен в 1891-1892 годы, возможно, по проекту петербургского архитектора И.В. Шторма (рисунок 1a).

В 1895-1896 годы построены слесарная мастерская с кузней по проекту архитектора Р. Бернгардта, в 1895 году открыта метеостанция, а в 1896 году возведены больница, сыроварня, кожевенный завод и льнообделочная мастерская с водокачкой. В последние годы XIX века были построены деревянные дома для преподавателей училища, кирпичная баня, комплекс хозяйственных построек скотного двора [24].

В 1896 году состоялся первый выпуск из училища в количестве 17 человек. До 1917 года в среднем за год в училище обучалось по 30-60 человек, большинство из которых были крестьянские дети. Всего до 1917 года из стен училища было выпущено 310 специалистов – помощников управляющих и сельскохозяйственных старост.

После Октябрьской революции училище было реорганизовано в Сельскохозяйственный техникум (1918-1926 годы), в котором готовили агрономов (выпуски 1919-1925 годов) и техников животноводов (выпуск 1926 года). В 1926 году учебное заведение было переименовано в Техникум животноводства и молочного хозяйства, а в 1933 году – в Зоотехнический техникум, где до момента закрытия в 1987 году готовили зоотехников. В первые десятилетия советского периода учебное хозяйство техникума (ферма крупного рогатого скота, свинарник, конюшня, огород, пасека) было образцовым для колхозов Кологривского района.

Тяжелым испытанием стали годы Великой Отечественной войны. Многие выпускники, учащиеся и преподаватели ушли на фронт и не вернулись. В военные годы контингент обучающихся комплектовался в основном за счет девушек. В Екимцево были эвакуированы Московский институт землеустройства, Московский торфоустроительный техникум и Загорский зоотехникум. Учебные занятия проводились в две смены, а тяжелая работа по ведению хозяйства техникума легла на женщин. После войны был отмечен трудовой подвиг коллектива – 24 сотрудника были награждены медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг.».

В послевоенные годы началось постепенное улучшение жизни техникума. В начале 1960-ых годов построено новое двухэтажное здание общежития на месте бывших мастерских на 180 мест. Проводились работы по благоустройству территории техникума (рисунки 1b, 1c, 1d). В 1965 году ветхое здание маслосырзавода перестроено в административный корпус. С 1965 по 1970 годы построен 8-ми квартирный жилой дом, котельная, теплотрасса. К 1972 году построена новая ферма для крупного рогатого скота на 100 голов.

В 1970-ые годы техникум стал испытывать трудности с набором контингента обучающихся. Если ранее набор первокурсников проводился из юношей и девушек Костромской области, то в последующие годы профориентационная работа проводились с абитуриентами, не прошедшими в другие учебные заведения по конкурсу в других

регионах СССР (Закарпатская область Украины, Мангышлакская область Казахстана, республики Чувашия и Дагестан). В 1987 году в целях упорядочивания сети средних специальных учебных заведений Кологривский зоотехнический техникум был ликвидирован. Многие преподаватели и служащие вынужденно покинули поселок.

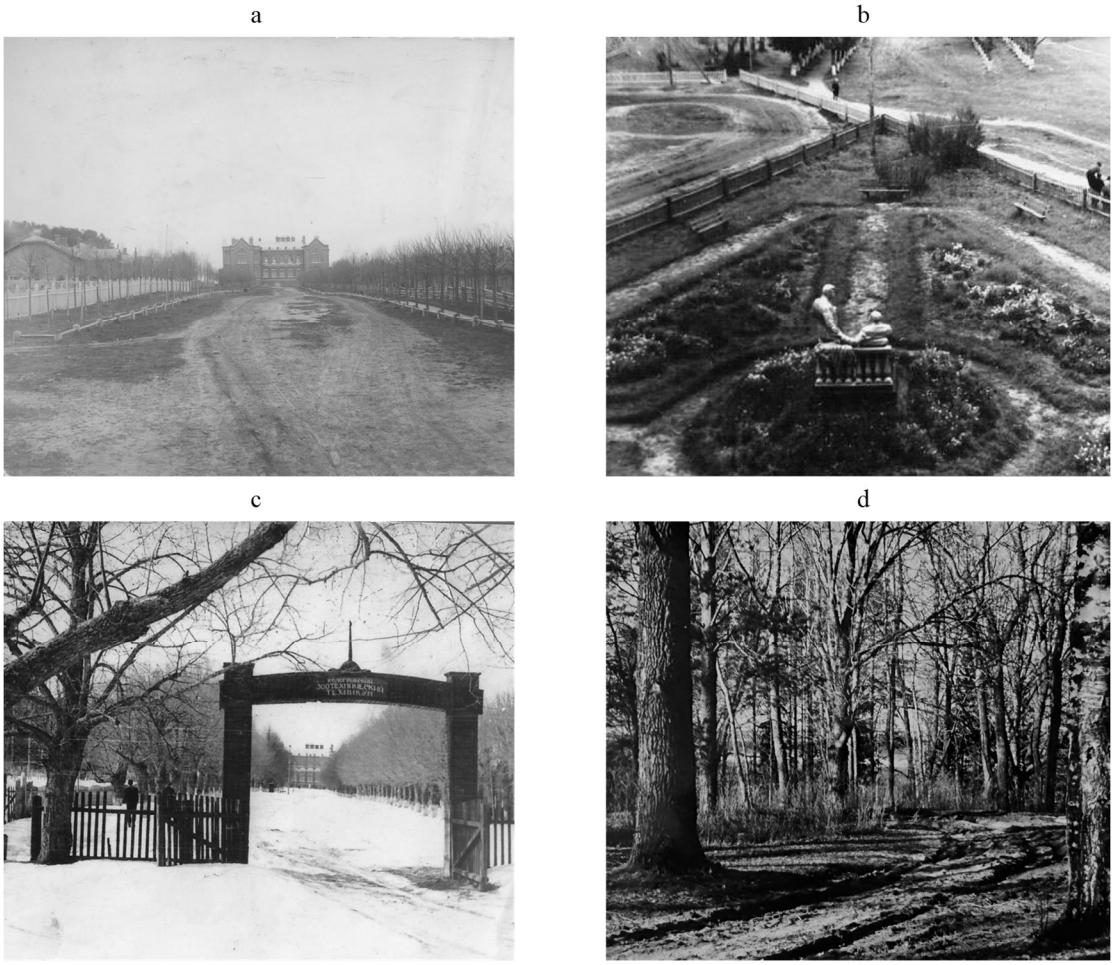


Рисунок 1. Исторический образ кампуса: a) вид на учебный корпус и липовую аллею, первая четверть XX века, b) цветник около учебного корпуса, 1950-1960 годы, c) вход на территорию, 1961 год, d) парк ранней весной, 1960-1975 годы

Figure 1. Historical views of the campus: a) view of the academic building and linden alley, first quarter of the 20th century, b) flower garden near the academic building, 1950-1960, c) entrance to the territory, 1961, d) park in early spring, 1960-1975

Источник: фотографии из фондов отдела по делам архивов администрации Кологривского муниципального округа Костромской области

Source: photographs from the funds of the archives department of the administration of the Kologrivsky municipal district of the Kostroma region

В 1993 году комплекс зоотехникума внесен в перечень объектов культурного наследия регионального значения (Постановление Главы Администрации Костромской области от 30 декабря 1993 года № 598 «Об объявлении находящихся на территории Костромской области объектов, имеющих историческую, культурную и научную ценность, памятниками истории и культуры»). В

реестр включены ансамбль Сельскохозяйственно-технического училища имени Ф.В. Чижова, а также учебный корпус, баня, зерносклад, молочная и сыроварня, мельница, жилой корпус, скотный двор, дома для сотрудников, парк.

Методика исследования. Исследования проводились с применением трех основных методов [14, 27]: 1) историко-архивная экспертиза; 2) натурные обследования; 3) картографирование и геоинформационное моделирование. Сбор исторических сведений проводился в фондах Государственного архива Костромской области, Костромского государственного историко-архитектурного и художественного музея-заповедника, Кологривского краеведческого музея имени Г.А. Ладыженского, отдела по делам архивов администрации Кологривского муниципального округа Костромской области. Также выполнялось обобщение сведений о зоотехникуме, содержащихся в краеведческой литературе, в публикациях из газеты «Кологривский край».

Натурные обследования территории проводились в течение вегетационных периодов 2023-2025 годов. Полевые работы включали выполнение фотофиксации и составление опорного плана территории, на котором отмечались границы существующих зеленых насаждений, архитектурные сооружения, дорожная сеть. При инвентаризации древесных растений использовалось мобильное приложение Arboreal Forest [28-30], с помощью которого собирались данные о пространственном положении деревьев (прямоугольные и географические координаты) и диаметрах стволов на высоте 1,3 м. Для измерения высот деревьев применялся ультразвуковой высотомер Haglof Vertex IV. Для каждого учтенного дерева определялась категория санитарного состояния в соответствии со шкалой из Правил санитарной безопасности в лесах (Постановление Правительства РФ от 9 декабря 2020 года №2047). Маршрутным методом выполнялся учет подроста и подлеска, травянистого покрова. Для подпологовых древесных растений глазомерно определялась средняя высота и густота. Для видов, образующих травянистый покров, визуально оценивалась встречаемость по пятибалльной шкале [31]: 1 – очень редко, 2 – редко, 3 – нечасто, 4 – часто, 5 – обычно.

На заключительном этапе проводились камеральные работы, в ходе которых на основе опорного плана и данных инвентаризации зеленых насаждений составлялся план пространственно-планировочной организации территории (AutoCAD 2023, Adobe Photoshop 2022). Изолинии рельефа на плане проводились с сечением 5 м с использованием данных о высотных отметках точек местности из программы Google Earth. Для древостоя, подроста и подлеска оформлялись перечетные и ассортиментные ведомости. По результатам измерений таксационных показателей деревьев по отдельным породам строились ряды распределения стволов по ступеням толщины с градацией 4 см, а также для оценки вертикальной структуры насаждений оценивались уравнения зависимости высот от диаметров [32]:

$$h = 1{,}3 + \left(\frac{DBH}{b_0 + b_1 DBH}\right)^2,$$

где h – высота, м; DBH – диаметр ствола на высоте 1,3 м, см; b_0 и b_1 – эмпирические коэффициенты.

Результаты и обсуждение

Современная планировка территории зоотехникума показана на рисунке 2. Основу архитектурного ансамбля составляют сохранившиеся каменные постройки: учебный корпус, баня с прачечной, – и деревянные строения: зерносклад, сыроварня, дома для сотрудников. В пространственной композиции доминирующее положение занимает двухэтажный учебный корпус в формах эклектики. Высокие щипцы ризалитов на флангах фасадов и в центре южного торца, большие стрельчатые окна под ними, возвышающиеся над вальмовой кровлей дымовые трубы делают здание похожим на готический замок. В архитектурном облике ансамбля домов для преподавателей и служащих удачно соединяются элементы русского стиля и черты модерна. Одной из наиболее выразительных хозяйственных построек является зерносклад, расположенный рядом с учебным корпусом.

Композиционной осью пространства служит трехрядная липовая аллея, которая проходит от

учебного корпуса до парка. Возраст самых старых деревьев в аллейных посадках составляет около 130 лет. Аллея визуально разделена на четыре зоны, которые отличаются количеством деревьев в ряду: 1) 9 деревьев (у главного учебного корпуса), 2) 11 деревьев, 3) 17 деревьев, 4) 27 деревьев (у парка). Расстояние между деревьями в ряду 3,0 м, между центральными рядами – 12,0 м, между центральным и крайним рядами – 3,5 м.

Парк расположен на небольшом мысе, образованном излучиной речки Ядрилихи. В середине XIX века на этом месте был усадебный парк, в юго-западной части которого находился господский дом и хозяйственные постройки. От парковых структур XIX века сохранились отдельные элементы старовозрастных посадок липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) возрастом около 180-190 лет. Наиболее вероятно, что усадебный парк имел традиционную боскетную планировку с пересекающимися аллеями и аллеей по кромке террасы. В конце XIX века при организации училища липовый парк претерпел значительные изменения. К существовавшим регулярным структурам были добавлены пейзажные элементы. В этот период созданы новые аллейные посадки из липы, а также появились многочисленные одиночные деревья и их группы со свободным размещением. Обогащение дендрофлоры, вероятно, проводилось также и в советский период, например, посадки тополя вокруг танцплощадки в юго-западной части парка. В глубине насаждений находится могила С. Воронцова – учащегося техникума, секретаря комсомольской ячейки, погибшего в 1920-ые годы при спасении товарища, тонувшего в реке Унже.

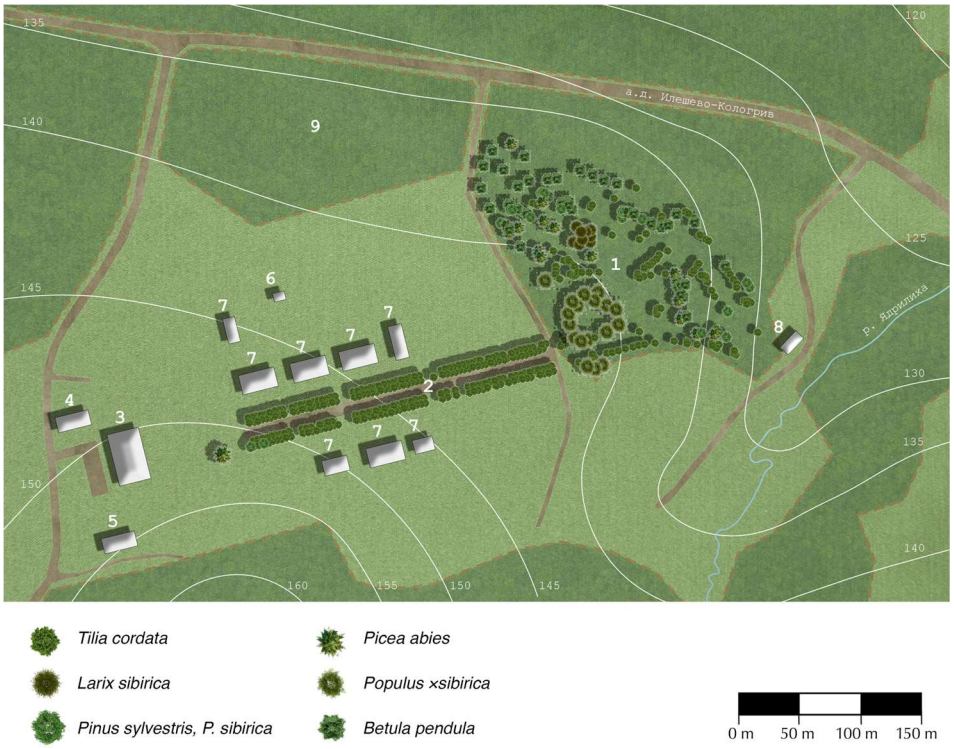


Рисунок 2. Современная планировка территории (1 – парк, 2 – липовая аллея, 3 – учебный корпус, 4 – зерносклад, 5 – сыроварня, 6 – баня с прачечной, 7 – дома для сотрудников, 8 – водокачка, 9 – лесной массив)

Figure 2. Modern layout of the territory (1 – park, 2 – linden alley, 3 – educational building, 4 – grain warehouse, 5 – cheese factory, 6 – bathhouse with laundry, 7 – houses for employees, 8 – water pump, 9 – forest area)

Источник: собственная композиция автора

Source: author’s composition

Кроме липы, часто встречающейся в букетных посадках, до настоящего времени сохранились старовозрастные деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H.Karst.), березы повислой (*Betula pendula* Roth), вяза гладкого (*Ulmus laevis* Pall.), тополя сибирского (*Populus* × *sibirica* G.V.Krylov & G.V.Grig. ex A.K.Skvortsov), групповые посадки сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). Из архивных документов известно, что в парке также произрастало 3 вида березы (*Betula* L.), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), яблоня домашняя (Malus domestica (Suckow) Borkh.), ольха серая рассеченнолистная (*Alnus incana* var. *acuminata* (Regel) Regel), тополь Максимовича (*Populus maximowiczii* A.Henry), тополь лавролистный (*P. laurifolia* Ledeb.), тополь бальзамический (*P. balsamifera* L.) и др.

Распределение деревьев, формирующих липовую аллею и парковые структуры, по ступеням толщины показано на рисунке 3. Для ряда распределения липы по диаметру ствола в аллейных посадках характерна бимодальная структура. Первую часть ряда распределения со ступенями толщины от 4 до 26 см формируют молодые деревья порослевого происхождения на месте погибших и удаленных, а вторую часть – со ступенями толщины от 32 до 108 см составляют старовозрастные деревья, высаженные до 1987 года (рисунок 3a). Выраженная правосторонняя асимметрия второй части ряда распределения может указывать на регулярное проведение в советский период дополняющих посадок взамен погибших деревьев.

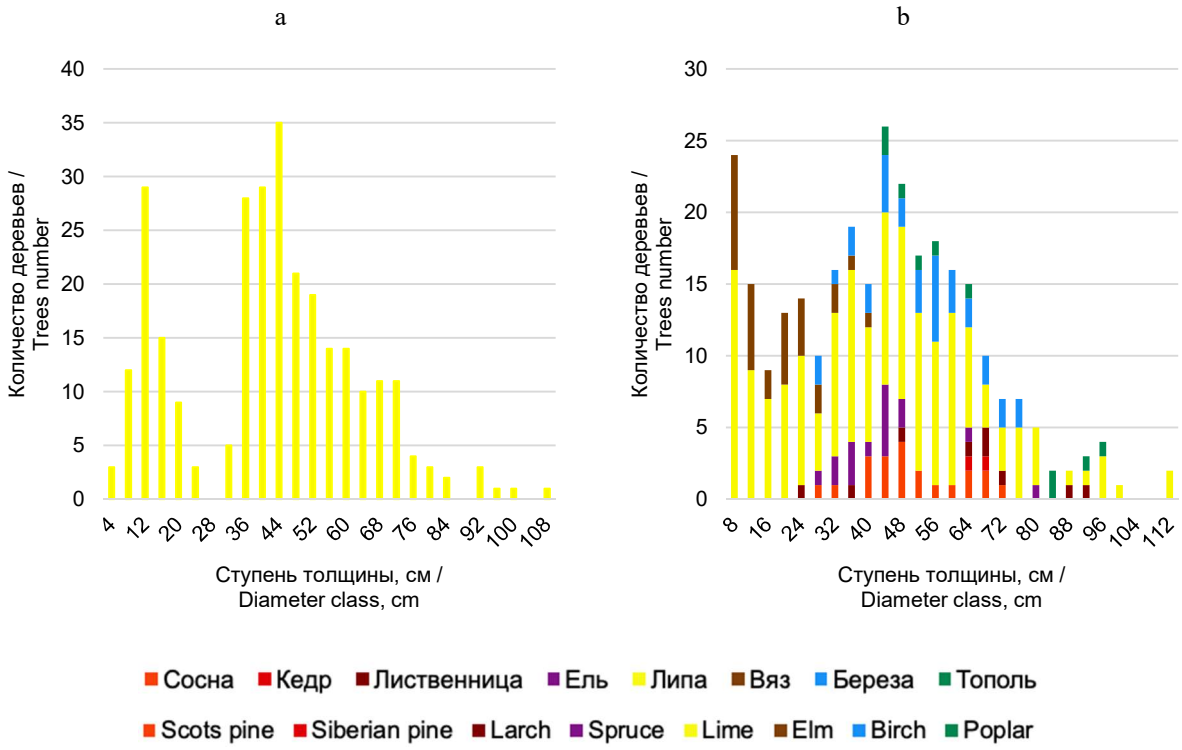


Рисунок 3. Распределение учтенных деревьев по ступеням толщины: a) липовая аллея, b) парк
Figure 3. Distribution of the recorded trees by diameter classes: a) linden alley, b) park

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

В парковом насаждении в ряде распределения деревьев по толщине можно выделить несколько возрастных поколений для вяза и липы (рисунок 3b). Первая группа – это молодые деревья с диаметрами ствола, относящимися к ступеням толщины от 8 до 24 см. Вторая группа, в

которую входит подавляющее количество деревьев, от 24 до 80 см. Третью группу образуют единично сохранившиеся крупномерные деревья, относящиеся к ступеням толщины от 84 до 112 см. Для других древесных пород варьирование диаметров стволов происходит в следующих диапазонах ступеней толщины: сосна – от 28 до 72 см, ель – от 28 до 80 см, береза – от 28 до 76 см, тополь – от 44 до 96 см. В целом мультимодальный характер ряда распределения деревьев по ступеням толщины указывает на несколько этапов формирования древесных насаждений парка. Характерными модальными интервалами являются ступени толщины 8, 44 и 96 см.

По данным выборочных измерений высот и диаметров деревьев в аллейных посадках и парковых насаждениях получены оценки параметров уравнений связи, а также рассчитаны метрики качества: квадратный корень из среднеквадратической ошибки *(RMSE*), средний абсолютный процент ошибки (*MAPE)* и коэффициент детерминации (R^2). Результаты оценки уравнений представлены в таблице 1. Для каждой древесной породы получена видоспецифичная зависимость высот деревьев от их диаметров. Уравнения объясняют от 75 до 95% изменчивости высот (R^2 изменяется от 0,750 до 0,951), имеют величину *RMSE* от 1,023 до 2,349 м и средний абсолютный процент ошибки от 2,888 до 8,844%.

Таблица 1

Оценка уравнений зависимости высот от диаметров деревьев

Table 1

Estimation of the equations for the dependence of tree heights on tree diameters

Объект | Object	Вид | Species	Оценки параметров | Paramaters estimates		*RMSE*	*MAPE*	R^2
		b_0	b_1			
Аллея | Alley	Липа сердцевидная | Small-leaved lime	1,223	0,197	1,635	6,849	0,897
Парк | Park	Сосна обыкновенная | Scots pine	1,355	0,158	1,023	2,888	0,817
	Лиственница сибирская | Siberian larch	1,054	0,168	1,631	4,813	0,750
	Ель обыкновенная | Norway spruce	1,459	0,152	1,662	4,502	0,767
	Липа сердцевидная | Small-leaved lime	1,489	0,172	2,349	8,844	0,853
	Вяз гладкий | European white elm	1,449	0,181	1,053	6,568	0,951
	Тополь сибирский | Siberian balsam poplar	1,699	0,146	1,313	3,496	0,843
	Береза повислая | Silver birch	2,371	0,150	1,486	4,327	0,814

Источник: собственные вычисления автора

Source: author's calculation

Кривые высот для отдельных пород деревьев показаны на рисунке 4, что отражает вертикальную структуру древесного полога. В парковом насаждении максимальных высот (более 35 м) достигают крупномерные деревья тополя и ели. Наиболее толстые деревья сосны, березы и лиственницы имеют высоты от 30 до 35 м. При равных ступенях толщины липа в аллейных посадках имеет меньшие высоты, чем в составе паркового насаждения. Это связано с различной интенсивностью действия ценотических факторов, а также с тем, что в советский период у деревьев, формирующих аллеи, проводилась регулярная обрезка.

Распределение учтенных деревьев в аллейных и парковых насаждениях по категориям санитарного состояния показано на рисунке 5. В липовых аллеях без признаков ослабления 23%

деревьев, ослабленные составляют 28%, сильно ослабленные – 23%, усыхающие – 22% и сухостойные – 4%. В парковом насаждении деревьев без признаков ослабления 24%, ослабленных 20%, сильно ослабленных 21%, усыхающих 21% и сухостойных 14%. Средневзвешенная по количеству деревьев категория санитарного состояния деревьев в аллеях составляет 2,56, а для парковых насаждений – 2,81. Таким образом, рассматриваемые древесные насаждения можно считать сильно ослабленными, и они нуждаются в проведении санитарно-оздоровительных мероприятий.

Ярус подлеска в парковом насаждении образуют как дикорастущие деревья и кустарники, так и декоративные. Из декоративных растений жимолость татарская (*Lonicera tatarica* L.), боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* Pall.), смородина альпийская (*Ribes alpinum* L.), спирея дубравколистная (*Spiraea chamaedryfolia* L.) образуют густые заросли. В местах первоначального культивирования, не распространяясь на прилегающие участки, встречаются чубушник венечный (*Philadelphus coronarius* L.), сирень венгерская (*Syringa josikaea* J. Jacq. ex Rchb.), сирень обыкновенная (*S. vulgaris* L.), карагана древовидная (*Caragana arborescens* Lam.), карагана кустарниковая (*C. frutex* (L.) K.Koch), боярышник черный (*Crataegus nigra* Waldst. & Kit.), свидина белая (*Cornus alba* L.), кизильник блестящий (*Cotoneaster acutifolius* Turcz.).

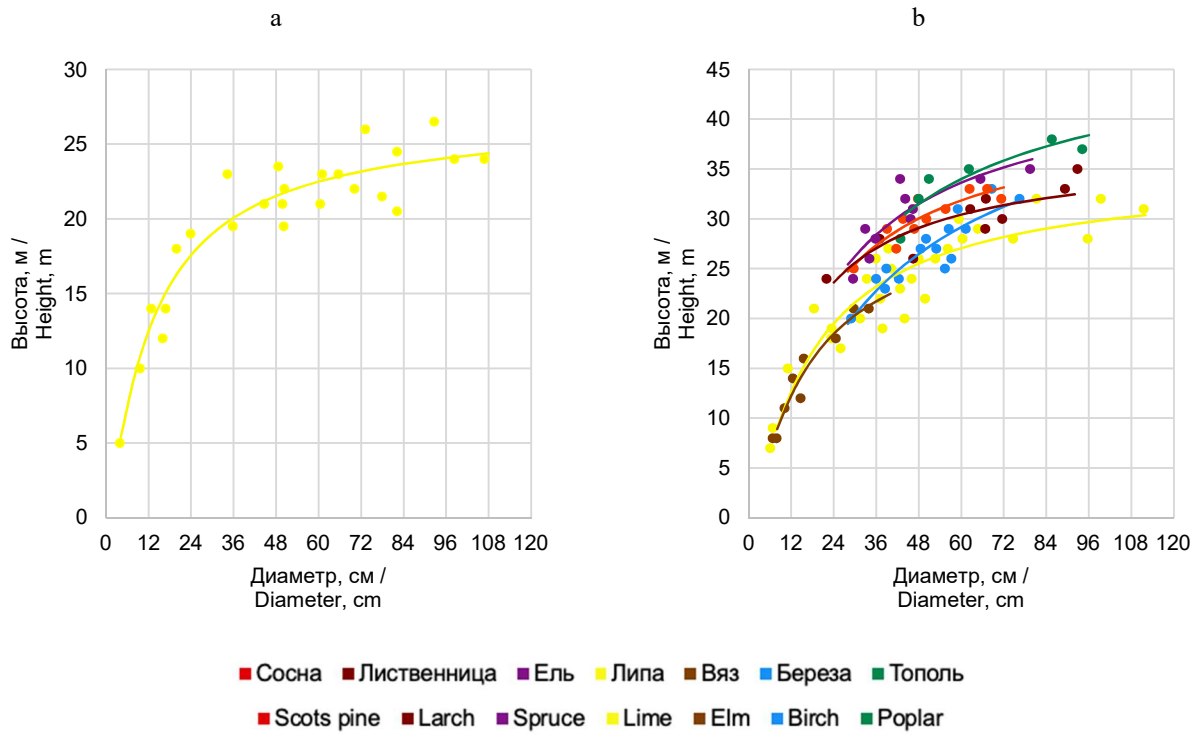


Рисунок 4. Кривые высот деревьев: a) липовая аллея, b) парк
Figure 4. Tree height curves: a) linden alley, b) park

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

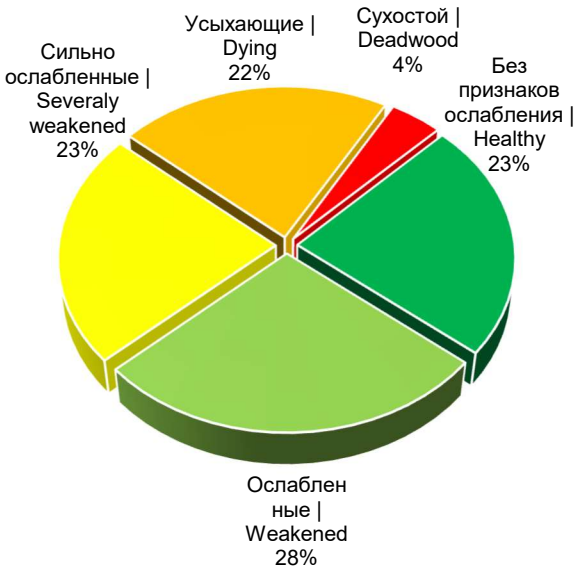
Известно, что в 1980-ые годы в парке произрастал барбарис обыкновенный (*Berberis vulgaris* L.). Без ухода многие декоративные виды находятся в неудовлетворительном состоянии и утратили эстетическую привлекательность. Из дикорастущих подлесочных деревьев и кустарников в парковом насаждении произрастают черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), жимолость настоящая (*Lonicera xylosteum* L.), малина

обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), смородина колосистая (*Ribes spicatum* E.Robson), смородина черная (*R. nigrum* L.), калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.), волчеягодник обыкновенный (*Daphne mezereum* L.).

Под пологом парковых насаждений активно формируется молодое поколение деревьев. Практическим повсеместно в пригодных для лесовозобновления условиях в парке встречается подрост разной крупности липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и вяза гладкого (*Ulmus laevis* Pall.). Были встречены единичные экземпляры пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), клена татарского (*Acer tataricum* L.) и ивы козьей (*Salix caprea* L.). Без проведения хозяйственных мероприятий намечается тенденция к формированию на месте парка липово-вязового насаждения со снижением видового разнообразия древесных растений.

Травянистый покров образован типичными видами для подзоны южной тайги европейской части России. Видовой состав и встречаемость растений в парке и аллее показаны в таблице 2. Всего выявлено 83 вида растений, образующих травянистый покров, которые относятся к 28 семействам. Наиболее представлены в травянистом покрове по количеству видов семейства астровые (*Asteraceae* Bercht. & J.Presl), зонтичные (*Apiaceae* Lindl.), мятликовые (*Poaceae* Barnhart), розовые (*Rosaceae* Juss.), бобовые (*Fabaceae* Lindl.), которые являются также ведущими, например, во флоре государственного заповедника «Кологривский лес» [31], бассейна реки Вохма (северо-восток Костромской области) [33]. Под пологом парка выявлено 68 видов растений в травянистом покрова, а под пологом липовой аллеи – 46 видов.

a



b

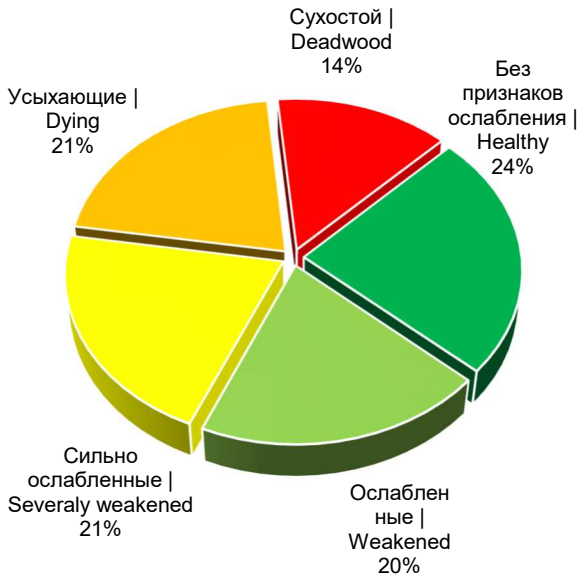


Рисунок 5. Распределение деревьев по категориям санитарного состояния: a) липовая аллея, b) парк
Figure 5. Distribution of trees by sanitary condition categories: a) linden alley, b) park

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Общий облик травянистого покрова в липовых аллеях формируют в основном луговые виды. Наиболее типичными являются ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), клевер гибридный (*Trifolium hybridum* L.), купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), подорожник большой (*Plantago major* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* (L.) Webb ex F.H.Wigg.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.). В парковом насаждении под древесным пологом в травянистом ярусе заметно преобладают лесные виды, а на открытых пространствах – луговые виды. Из лесных видов наиболее часто

встречаются ожика волосистая (*Luzula pilosa* (L.) Willd.), ветреничка лютиковидная (*Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub), лютик кашубский (*Ranunculus cassubicus* L.), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.). Из дикорастущих видов в парке высокие декоративные качества в период цветения имеют ветреничка лютиковидная (*Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub), хохлатка плотная (*Corydalis solida* (L.) Clairv.). Из видов, использовавшихся в цветочном оформлении парка, спустя более чем три десятилетия сохранились гусиный лук малый (*Gagea minima* (L.) Ker Gawl.), водосбор обыкновенный (*Aquilegia vulgaris* L.), гвоздика бородатая (*Dianthus barbatus* L.), а также почвопокровный вид – земляника мускусная (*Fragaria moschata* Duchesne ex Weston).

К деградации растительных сообществ парка приводит активное распространение инвазивного вида – борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.). Его популяция занимает около половины парковой площади. Ежегодное применение гербицидов привело к полному уничтожению травянистой и кустарниковой растительности в юго-западной части парка. Распространение борщевика, использование химического метода борьбы с ним создает угрозу физической утраты паркового ландшафта, входящего в перечень объектов культурного наследия регионального значения.

Современное состояние территории техникума показано на рисунке 6. В качестве основных проблем земельных участков комплекса с сохранившимися объектами озеленения можно выделить следующие: 1) наличие большого количества сильно ослабленных и погибших деревьев, 2) захламление парка крупными древесными остатками (стволы деревьев, ветви), 3) зарастание борщевиком Сосновского (Heracleum sosnowskyi Manden.), 4) сформировавшийся естественным путем закрытый парковый ландшафт с вертикальной сомкнутостью полога, утративший эстетическую и рекреационную ценность, 5) захламление бытовым мусором.

Таблица 2

Видовой состав и встречаемость растений в травянистом покрове

Table 2

Species composition and occurrence of plants in the herbaceous cover

	Вид | Species	Встречаемость | Occurrence	
		Аллея | Alley	Парк | Park
I. Семейство щитовниковые (*Dryopteridaceae* Herter)			
1	Щитовник картузианский (*Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P.Fuchs)	-	3
II. Семейство хвощевые (*Equisetum* L.)			
2	Хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.)	-	2
3	Хвощ луговой (*Equisetum pratense* Ehrh.)	-	2
4	Хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.)	1	-
III. Семейство мятликовые (*Poaceae* Barnhart)			
5	Вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth)	3	3
6	Вейник тростниковый (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth)	-	2
7	Ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.)	4	2
8	Луговик дернистый (*Deschampsia cespitosa* (L.) P.Beauv.)	-	2
9	Полевица гигантская (*Agrostis gigantea* Roth)	3	-
10	Пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski)	1	-
11	Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.)	3	-
IV. Семейство осоковые (*Cyperaceae* Juss.)			
12	Осока колосистая (*Carex spicata* Huds.)	1	-
V. Семейство ситниковые (*Juncaceae* Juss.)			
13	Ожика волосистая (*Luzula pilosa* (L.) Willd.)	-	5
14	Ситник нитевидный (*Juncus filiformis* L.)	-	1
VI. Семейство лилейные (*Liliaceae* Juss.)			
15	Гусиный лук малый (*Gagea minima* (L.) Ker Gawl.)	-	1
VII. Семейство мелантиевые (*Melanthiaceae* Batsch ex Borkh.)			

16	Вороний глаз четырехлистный (*Paris quadrifolia* L.)	-	2
VIII. Семейство орхидные (*Orchidaceae* Juss.)			
17	Пальчатокоренник Фукса (*Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Soó)	-	1
IX. Семейство крапивные (*Urticaceae* Juss.)			
18	Крапива двудомная (*Urtica dioica* L.)	-	3
X. Семейство кирказоновые (*Aristolochiaceae* Juss.)			
19	Копытень европейский (*Asarum europaeum* L.)	-	3
XI. Семейство гвоздичные (*Caryophyllaceae* Juss.)			
20	Гвоздика бородатая (*Dianthus barbatus* L.)	-	1
21	Звездчатка злаковая (*Stellaria graminea* L.)	2	2
22	Звездчатка ланцетолистная (*Stellaria holostea* L.)	-	3
23	Мерингия трехжилковая (*Moehringia trinervia* (L.) Clairv.)	2	-
XII. Семейство лютиковые (*Ranunculaceae* Juss.)			
24	Ветреничка лютиковидная (*Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub)	-	4
25	Водосбор обыкновенный (*Aquilegia vulgaris* L.)	1	1
26	Воронец колосистый (*Actaea spicata* L.)	-	2
27	Лютик едкий (*Ranunculus acris* L.)	1	-
28	Лютик кашубский (*Ranunculus cassubicus* L.)	-	5
XIII. Семейство маковые (*Papaveraceae* Juss.)			
29	Хохлатка плотная (*Corydalis solida* (L.) Clairv.)	-	3
XIV. Семейство розовые (*Rosaceae* Juss.)			
30	Гравилат городской (*Geum urbanum* L.)	-	2
31	Гравилат речной (*Geum rivale* L.)	-	3
32	Земляника лесная (*Fragaria vesca* L.)	-	3
33	Земляника мускусная (*Fragaria moschata* Duchesne ex Weston)	2	4
34	Костяника каменистая (*Rubus saxatilis* L.)	-	3
35	Лапчатка гусиная (*Argentina anserina* L.)	4	-
36	Лапчатка серебристая (*Potentilla argentea* L.)	2	-
37	Таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.)	-	2
XV. Семейство бобовые (*Fabaceae* Lindl.)			
38	Горошек заборный (*Vicia sepium* L.)	-	5
39	Горошек мышиный (*Vicia cracca* L.)	4	3
40	Клевер гибридный (*Trifolium hybridum* L.)	4	-
41	Клевер луговой (*Trifolium pratense* L.)	3	-
42	Клевер средний (*Trifolium medium* L.)	-	-
43	Люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.)	1	-
44	Чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.)	-	2
XVI. Семейство гераниевые (*Geraniaceae* Juss.)			
45	Герань луговая (*Geranium pratense* L.)	2	2
XVII. Семейство кисличные (*Oxalidaceae* R.Br.)			
46	Кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.)	-	4
XVIII. Семейство зверобойные (*Hypericaceae* Juss.)			
47	Зверобой пятнистый (*Hypericum maculatum* Crantz)	3	2
XIX. Семейство кипрейные (*Onagraceae* Juss.)			
48	Кипрей узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.)	2	2
XX. Семейство зонтичные (*Apiaceae* Lindl.)			
49	Бедренец камнеломка (*Pimpinella saxifraga* L.)	2	2
50	Борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.)	2	4
51	Дудник лесной (*Angelica sylvestris* L.)	2	3
52	Купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.)	5	3
53	Сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.)	2	5
54	Тмин обыкновенный (*Carum carvi* L.)	-	1
XXI. Семейство первоцветные (*Primulaceae* Batsch ex Borkh.)			

55	Вербейник монетный (*Lysimachia nummularia* L., Sp. Pl.)	-	5
XXII. Семейство бурачниковые (*Boraginaceae* Juss.)			
56	Незабудка лесная (*Myosotis sylvatica* Hoffm.)	-	3
XXIII. Семейство яснотковые (*Lamiaceae* Martinov)			
57	Душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.)	-	1
58	Живучка ползучая (*Ajuga reptans* L.)	-	3
59	Черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris* L.)	3	3
XXIV. Семейство заразиховые (*Orobanchaceae* Vent.)			
60	Марьянник луговой (*Melampyrum pratense* L.)	-	2
XXV. Семейство подорожниковые (*Plantaginaceae* Juss.)			
61	Вероника дубравная (*Veronica chamaedrys* L.)	2	2
62	Вероника лекарственная (*Veronica officinalis* L.)	-	1
63	Подорожник большой (*Plantago major* L.)	5	3
XXVI. Семейство мареновые (*Rubiaceae* Juss.)			
64	Подмаренник мягкий (*Galium mollugo* L.)	3	4
65	Подмаренник топяной (*Galium uliginosum* L.)	-	2
XXVII. Семейство колокольчиковые (*Campanulaceae* Juss.)			
66	Колокольчик рапунцелевидный (*Campanula rapunculoides* L.)	-	1
67	Колокольчик раскидистый (*Campanula patula* L.)	3	2
XXVIII. Семейство астровые (*Asteraceae* Bercht. & J.Presl)			
68	Бодяк обыкновенный (*Cirsium vulgare* (Savi) Ten.)	1	2
69	Бодяк полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.)	3	3
70	Василек фригийский (*Centaurea phrygia* L.,)	3	2
71	Горлюха ястребинковая (*Picris hieracioides* L.)	2	3
72	Кульбаба осенняя (*Scorzoneroides autumnalis* (L.) Moench)	4	-
73	Лопух паутинистый (*Arctium tomentosum* Mill.)	3	2
74	Мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.)	3	2
75	Мелколепестник канадский (*Erigeron canadensis* L.)	3	2
76	Нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare* Lam.)	3	1
77	Одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* (L.) Webb ex F.H.Wigg.)	4	2
78	Пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.)	2	2
79	Полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris* L.)	3	2
80	Сухоцветка лесная (*Omalotheca sylvatica* (L.) Sch.Bip. & F.W.Schultz)	1	-
81	Тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.)	4	2
82	Чертополох курчавый (*Carduus crispus* L.)	1	1
83	Ястребинка зонтичная (*Hieracium umbellatum* L.)	2	2
1 – очень редко, 2 – редко, 3 – нечасто, 4 – часто, 5 – обычно | 1 – very rare, 2 – rare, 3 – Infrequently, 4 – often, 5 – usually			

Источник: собственные исследования автора

Source: author's research

Для решения обозначенных проблем необходимо проведение лесохозяйственных мероприятий: санитарно-оздоровительных (рубка погибших деревьев, уборка сухостоя и крупных древесных остатков) и по уходу за насаждениями. С целью сохранения ландшафта объекта культурного наследия требуется проведение комплекса работ по восстановлению парковых и аллейных посадок с использованием ассортимента древесно-кустарниковых растений, идентичного историческому. Для сохранения растительного покрова необходимо исключить химический метод борьбы с борщевиком Сосновского.

Предпочтительным является комплексный подход, сочетающий механические и агротехнические методы борьбы.

В настоящее время архитектурно-ландшафтный ансамбль бывшего зоотехникума, включая его зеленые насаждения – исторический парк и липовую аллею, – обладает статусом объекта

культурного наследия регионального значения. Несмотря на официальный охранный статус и признанный туристский потенциал, комплекс пребывает в состоянии деградации. Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о необходимости разработки и скорейшей реализации комплекса консервационных и реставрационных мероприятий. Успешная реализация этих мер является обязательным условием не только для обеспечения физической сохранности объектов, но и для их адаптации к современному использованию, что позволит интегрировать данный уникальный памятник в региональные туристские маршруты, а также в полной мере раскрыть его просветительский и рекреационный потенциал.



Рисунок 6. Современное состояние территории: a) вид на учебный корпус и липовую аллею, b) прилегающая к учебному корпусу территория, c) вход в парк от липовой аллеи, d) букетные посадки липы в парке

Figure 6. Current state of the territory: a) view of the academic building and linden alley, b) territory adjacent to the academic building, c) entrance to the park from the linden alley, d) bouquet plantings of linden in the park

Источник: собственные изображения автора

Source: author’s images

Заключение

Проведенное исследование позволило впервые всесторонне оценить современное состояние исторических зеленых насаждений на территории бывшего Кологривского низшего сельскохозяйственного технического училища

имени Ф.В. Чижова. Выявлена сложная пространственно-планировочная структура территории, включающая липовую аллею и пейзажный парк с фрагментами регулярной планировки и деревьями, возраст которых достигает 180-190 лет. Древесные насаждения находятся в ослабленном состоянии, а доля усыхающих и сухостойных деревьев достигает 26% в аллее и 35% в парке. Под пологом парка отмечено успешное естественное возобновление липы и вяза. В целом в ближайшие десятилетия прогнозируется снижению биоразнообразия и угроза утраты исторического ассортимента древесно-кустарниковых растений. Широкое распространение борщевика Сосновского на территории комплекса и использование химического метода борьбы с ним создает угрозу физической утраты паркового ландшафта.

Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о необходимости разработки и реализации комплекса консервационных и реставрационных мероприятий, в том числе лесоводственных по уходу за насаждениями и улучшению их санитарного состояния. Результаты исследования являются научной основой для разработки мероприятий по сохранению и восстановлению не только данного объекта, но и других провинциальных исторических парков центральной России, находящихся в схожем состоянии.

Список литературы

1. Mancilla D., Robledo S., Esenarro D., Raymundo V., Vega V. Green Corridors and Social Connectivity with a Sustainable Approach in the City of Cuzco in Peru. Urban Science. 2024; 8: 79. – DOI: https://doi.org/10.3390/urbansci8030079

2. Rzeszotarska-Pałka M. Manor and Park Estates – Resilience to Transformation and the New Management of Space Due to Political Changes: The Case of Western Pomerania (Poland). Sustainability. 2024; 16: 2562. – DOI: https://doi.org/10.3390/su16062562

3. Sikora D., Kaczyńska M. The Cultural Ecosystem Services as an Element Supporting Manor Landscape Protection. Sustainability. 2022; 14: 7733. – DOI: https://doi.org/10.3390/su14137733

4. Kulesza P., Lubiarz M., Kociuba P., Dubis L., Solski M. Cultural Ecosystem Services of historic parks in context of their functionality and spatial organisation by the example of Lublin, Lviv, and London. Landscape Online. 2025; 100: 1134. – DOI: https://doi.org/10.3097/LO.2025.1134

5. Wei J., Chen M., Chu C., Zhao C., Xia X., Li Y. Assessing cultural ecosystem services supply–demand balance of urban parks in the context of old and new urban districts. Ecological Indicators. 2024; 159: 111688. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111688

6. Mancilla-Bravo D.C., Chichipe-Mondragón V.M., Esenarro Vargas D., Uribe Quiroz C., Calderón Huamaní D., Ruiz Reyes E., Alfaro C., Veliz M. Ecological Park with a Sustainable Approach for the Revaluation of the Cultural and Historical Landscape of Pueblo Libre, Peru-2023. Clean Technologies. 2025; 7: 46. – DOI: https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020046

7. Buenaño C.P., García-Esparza J.A., Castelló A.J., Altaba P., Valentín A. Assessment of the ecological role of historic centres based on the relationship between biodiversity and urban composition. Heliyon. 2023; 9(9): e20135. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20135

8. Агальцова В.А. Сохранение мемориальных лесопарков. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 254 с.

9. Гусев Н.Н., Еремеев А.Г., Миронов С.Н. Старинные парки (восстановление, содержание, охрана). – М.: Экология, 1993. – 253 с.

10. Вергунов А.П., Горохов В.А. Русские сады и парки. – М.: Наука, 2007. – 422 с. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19626376

11. Яковенко Н.В., Рудницких А.А. Ботанико-географический анализ флоры старинных усадеб Воронежской области // Лесотехнический журнал. – 2024. – № 4(56). – С. 111-124. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/8

12. Полякова А.Ю. Усадьба Демидовых "Тайцы". Результаты обследования старовозрастных насаждений // Климат и природа. – 2021. – № 2(39). – С. 69-88. – DOI: https://doi.org/10.51618/2220-8259_2021_2_69

13. Петренко А.М., Полякова О.В., Семенищенков Ю.А., Фейгина Ж.М. К вопросу о реконструкции усадебного парка виллы Д. Сапожкова (Клинцовский район, Брянская область) // Ученые записки Брянского государственного университета. – 2016. – № 4. – С. 111-121. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30584469

14. Лебедев А.В., Кочнев Я.В. Усадьба Виц-Григорьевых (Костромская область): история создания и современное состояние // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2023. – № 27(4). – С. 104-116. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-4-104-116

15. Байрамова В.Ф., Исаев С.С. Анализ состояния насаждений усадьбы Стрешневых (Знаменское-Раёк) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2025. – № 253. – С. 155-167. – DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.253.155-167

16. Беляева Е.Л., Минкин С.А. Опыт работ по сохранению и приспособлению к современному использованию части парка усадьбы "Михалково" // Градостроительство. – 2019. – № 4(62). – С. 83-93. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41121043

17. Завидовская Т.С. К характеристике парка-усадьбы Волконских – уникального природного и культурного объекта и перспективной ООПТ // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2019. – № 23(2). – С. 133-140. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-2-133-140

18. Кривоногова А.С., Архипова Т.И. Вопросы сохранения и развития парка-усадьбы "Келло" // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2015. – № 213. – С. 62-74. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24872699

19. Ганичева О.В. Культурное наследие парка Кусково: связь времен и поколений // Вестник Университета Правительства Москвы. – 2023. – № 4(62). – С. 60-66. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59072653

20. Попова Н.Н. Бриофлора старинных усадебных парков Липецкой области // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. – 2023. – № 1(69). – С. 216-249. – DOI: https://doi.org/10.26456/vtbio299

21. Ковешников А.И., Ковешникова Н.А. Усадебно-парковые комплексы Орловской области: тенденции и перспективы изучения // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2016. – № 2(59). – С. 16-20. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29370645

22. Гончарова Е.В. Садово-парковый комплекс в пространстве провинциальной усадьбы второй половины XVIII века (на примере Псковской губернии) // Ученые записки Орловского государственного университета. – 2022. – № 1(94). – С. 15-18. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48836092

23. Белоруков Д.Ф. Деревни, села и города костромского края: материалы для истории. Кострома: Костромской общественный фонд культуры, Костромской региональный центр новых информационных технологий «Эврика-М», 2000. – 535 с. – URL: https://file.kostromka.ru/pdf/belorukov/derevni.pdf

24. Рудченко В.М., Смирнов Г.К., Шармин П.Н., Щеболева Е.Г. Памятники архитектуры Костромской области. Каталог. Выпуск V. Кологривский район. Межевской район. Нейский район. Мантуровский район. Кострома, 2003. – 280 с. – URL: http://bibl-kostroma.ru/wp-content/uploads/2018/07/Pamyat-arkhitekt-kostromskoy-obl_v-10.pdf

25. Лебедев А.В., Криницын И.Г., Гостев В.В. Флора заповедника «Кологривский лес». Кологрив: Государственный природный заповедник "Кологривский лес", 2025. – 224 с. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80391367

26. Книга М.Д. Приоритетные направления деятельности аграрных школ европейской России в контексте государственных реформ XIX в. / Ежегодник по аграрной истории Восточной Европы. 2022 год: Государственная

власть и крестьянство. Секция по проблемам аграрной истории Научного совета РАН по фундаментальным вопросам российской и зарубежной истории. – Липецк: ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, 2023. – С. 55-70. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54389681

27. Леонова В.А., Куликова А.И., Тарасова Л.А. Состояние природных ландшафтов крестьянской усадьбы в деревне Асташово Костромской области и перспективы их развития // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – № 25(5). – С. 74-84. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-5-74-84

28. Лебедев А.В. Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона // Лесотехнический журнал. – 2023. – № 3(51). – С. 56-70. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5

29. Sandim A., Amaro M., Silva M.E., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Lousada J.L., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. Forests. 2023; 14: 1553. – DOI: https://doi.org/10.3390/f14081553

30. Schweizer D., Cole R.J., Werden L.K., Cedeño G.Q., Rodriguez D., Navarro K., Esquivel J.M., Max S., Chiriboga F.E., Zahawi R.A., Holl K.D., Crowther T.W. Review and assessment of smartphone apps for forest restoration monitoring. Restor Ecol. 2024; 32: e14136. – DOI: https://doi.org/10.1111/rec.14136

31. Лебедев А.В., Криницын И.Г., Гостев В.В. Таксономическая структура флоры сосудистых растений заповедника "Кологривский лес" // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 115-121. – DOI: https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-3-115-121

32. Lebedev A.V. New generalised height-diameter models for the birch stands in European Russia. Baltic Forestry. 2020; 26(2): 1-7. – DOI: https://doi.org/10.46490/BF499

33. Прилепский Н.Г. Растительный покров северо-востока Костромской области (бассейна р. Вохмы): специальность 03.00.05: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. – Москва, 1993. – 20 с. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30221365

References

1. Mancilla D., Robledo S., Esenarro D., Raymundo V., Vega V. Green Corridors and Social Connectivity with a Sustainable Approach in the City of Cuzco in Peru. Urban Science. 2024; 8: 79. – DOI: https://doi.org/10.3390/urbansci8030079

2. Rzeszotarska-Pałka M. Manor and Park Estates – Resilience to Transformation and the New Management of Space Due to Political Changes: The Case of Western Pomerania (Poland). Sustainability. 2024; 16: 2562. – DOI: https://doi.org/10.3390/su16062562

3. Sikora D., Kaczyńska M. The Cultural Ecosystem Services as an Element Supporting Manor Landscape Protection. Sustainability. 2022; 14: 7733. – DOI: https://doi.org/10.3390/su14137733

4. Kulesza P., Lubiarz M., Kociuba P., Dubis L., Solski M. Cultural Ecosystem Services of historic parks in context of their functionality and spatial organisation by the example of Lublin, Lviv, and London. Landscape Online. 2025; 100: 1134. – DOI: https://doi.org/10.3097/LO.2025.1134

5. Wei J., Chen M., Chu C., Zhao C., Xia X., Li Y. Assessing cultural ecosystem services supply–demand balance of urban parks in the context of old and new urban districts. Ecological Indicators. 2024; 159: 111688. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111688

6. Mancilla-Bravo D.C., Chichipe-Mondragón V.M., Esenarro Vargas D., Uribe Quiroz C., Calderón Huamaní D., Ruiz Reyes E., Alfaro C., Veliz M. Ecological Park with a Sustainable Approach for the Revaluation of the Cultural and Historical Landscape of Pueblo Libre, Peru-2023. Clean Technologies. 2025; 7: 46. – DOI: https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020046

7. Buenaño C.P., García-Esparza J.A., Castelló A.J., Altaba P., Valentín A. Assessment of the ecological role of historic centres based on the relationship between biodiversity and urban composition. Heliyon. 2023; 9(9): e20135. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20135

8. Agaltsova V.A. Sohranenie memorial'nyh lesoparkov [Preservation of memorial forest parks]. Moskva [Moscow], Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1980; 254 p.

9. Gusev N.N., Eremeev A.G., Mironov S.N. Starinnye parki (vosstanovlenie, soderzhanie, ohrana) [Старинные парки (восстановление, содержание, охрана)]. Moskva [Moscow], Ekologiya [Ecology], 1993; 253 p.

10. Vergunov A.P., Gorohov V.A. Russkie sady i parki [Russian gardens and parks]. Moskva [Moscow], Nauka [Science], 2007; 422 p. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19626376

11. Yakovenko N.V., Rudnitskikh A.A. *Botaniko-geograficheskij analiz flory starinnyh usadeb Voronezhskoj oblasti* [Botanical and geographical analysis of the old estates' flora in the Voronezh Region]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal]. 2024; 4(56): 111-124. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/8

12. Polyakova A.Yu. *Usad'ba Demidovyh "Tajcy". Rezul'taty obsledovaniya starovozrastnyh nasazhdenij* [Estate of the Demides "Taytsy". Survey results of old age plants]. Climate & Nature. 2021; 2(39): 69-88. – DOI: https://doi.org/10.51618/2220-8259_2021_2_69

13. Petrenko A.M., Polyakova O.V., Semenishchenkov Yu.A., Feigina Zh.M. *K voprosu o rekonstrukcii usadebnogo parka villy D. Sapozhkova (Klincovskij rajon, Bryanskaya oblast')* [To the reconstruction of the park of the Sapozhkov's Villa (Klintsovsky District, Bryansk Region)]. The Bryansk State University Memoirs. 2016; 4: 111-121. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30584469

14. Lebedev A.V., Kochnev Ya.V. *Usad'ba Vic-Grigor'evyh (Kostromskaya oblast'): istoriya sozdaniya i sovremennoe sostoyanie* [Noble estate of Vits-Grigoryevs (Kostroma Region): history of creation and current state]. Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. 2023; 27(4): 104-116. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-4-104-116

15. Bayramova V.F., Isaev S.S. *Analiz sostoyaniya nasazhdenij usad'by Streshnevyh (Znamenskoe-Rayok)* [Analysis of the condition of plantings of the Streshnev estate (Znamenskoye-Rayok)]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii. 2025; 253: 155-167. – DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.253.155-167

16. Belyaeva E.L., Minkin S.A. *Opyt rabot po sohraneniyu i prisposobleniyu k sovremennomu ispol'zovaniyu chasti parka usad'by "Mihalkovo"* [Work experience in preservation and adaptation to the modern use of the park of the Mikhalkovo hall]. *Gradostroitel'stvo* [Urban Planning]. 2019; 4(62): 83-93. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41121043

17. Zavidovskaya T.S. *K harakteristike parka-usad'by Volkonskih – unikal'nogo prirodnogo i kul'turnogo ob"ekta i perspektivnoj OOPT* [Characteristics of Volkonsky estate park as a unique natural and cultural site and perspective specially protected natural area]. Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. 2019; 23(2): 133-140. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-2-133-140

18. Krivonogova A.S. Arkhipova T.I. *Voprosy sohraneniya i razvitiya parka-usad'by "Kello"* [Issues of preservation and development of the park estate Kello]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii. 2015; 213: 62-74. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24872699

19. Ganicheva O.V. *Kul'turnoe nasledie parka Kuskovo: svyaz' vremen i pokolenij* [Cultural heritage of Kuskovo park: a link between times and generations]. *Vestnik Universiteta Pravitel'stva Moskvy* [Bulletin of the University of the Government of Moscow]. 2023; 4(62): 60-66. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59072653

20. Popova N.N. *Brioflora starinnyh usadebnyh parkov Lipeckoj oblasti* [Bryoflora of ancient residential parks of the Lipetsk Region]. Herald of Tver State University. Series: Biology and Ecology. 2023; 1(69): 216-249. – DOI: https://doi.org/10.26456/vtbio299

21. Koveshnikov A.I., Koveshnikova N.A. *Usadebno-parkovye kompleksy Orlovskoj oblasti: tendencii i perspektivy izucheniya* [The manor and park complexes of the Oryol Region: trends and prospects of studying]. Vestnik OrelGAU. 2016; 2(59): 16-20. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29370645

22. Goncharova E.V. *Sadovo-parkovyj kompleks v prostranstve provincial'noj usad'by vtoroj poloviny XVIII veka (na primere Pskovskoj gubernii)* [A garden and park complex in the space of a provincial noble estate the second half of the XVIII century (on the example of Pskov Province)]. Scientific Notes of Orel State University. 2022; 1(94): 15-18. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48836092

23. Belorukov D.F. *Derevni, sela i goroda kostromskogo kraya: materialy dlya istorii* [Villages, towns and cities of the Kostroma region: materials for history]. *Kostroma* [Kostroma]: *Kostromskoj obshchestvennyj fond kul'tury, Kostromskoj regional'nyj centr novyh informacionnyh tekhnologij «Evrika-M»* [Kostroma Public Cultural Foundation, Kostroma Regional Center for New Information Technologies "Eureka-M"], 2000; 535 p. – URL: http://bibl-kostroma.ru/wp-content/uploads/2018/07/Pamyat-arkhitekt-kostromskoy-obl_v-10.pdf

24. Rudchenko V.M., Smirnov G.K., Sharmin P.N., Shcheboleva E.G. *Pamyatniki arhitektury Kostromskoj oblasti. Katalog. Vypusk V. Kologrivskij rajon. Mezhevskoj rajon. Nejskij rajon. Manturovskij rajon* [Architectural monuments of the Kostroma region. Catalog. Issue V. Kologrivsky district. Mezhevsky district. Neysky district. Manturovsky district]. *Kostroma* [Kostroma], 2003; 280 p. – URL: http://bibl-kostroma.ru/wp-content/uploads/2018/07/Pamyat-arkhitekt-kostromskoy-obl_v-10.pdf

25. Lebedev A.V., Krinitsyn I.G., Gostev V.V. *Flora zapovednika «Kologrivskij les»* [Flora of the Kologrivsky Forest Nature Reserve]. *Kologriv* [Kologriv], Kologrivsky Forest Nature Reserve, 2025; 224 p. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80391367

26. Kniga M.D. *Prioritetnye napravleniya deyatel'nosti agrarnyh shkol evropejskoj Rossii v kontekste gosudarstvennyh reform XIX v.* [Priority areas of activity of agricultural schools in European Russia in the context of state reforms of the 19th century]. In: *Ezhegodnik po agrarnoj istorii Vostochnoj Evropy. 2022 god: Gosudarstvennaya vlast' i krest'yanstvo. Sekciya po problemam agrarnoj istorii Nauchnogo soveta RAN po fundamental'nym voprosam rossijskoj i zarubezhnoj istorii* [Yearbook on the Agrarian History of Eastern Europe. 2022: State Power and Peasantry. Section on Problems of Agrarian History of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Fundamental Issues of Russian and Foreign History]. *Lipetsk* [Lipetsk], *LGPU imeni P.P. Semenova-Tyan-Shanskogo* [LSPU named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky], 2023; 55-70. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54389681

27. Leonova V.A., Kulikova A.I., Tarasova L.A. *Sostoyanie prirodnyh landshaftov krest'yanskoj usad'by v derevne Astashovo Kostromskoj oblasti i perspek-tivy ih razvitiya* [Natural landscapes state of peasant manor in Astashovo village (Kostroma Region) and prospects of their development]. Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. 2021; 25(5): 74-84. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-5-74-84

28. Lebedev A.V. *Inventarizaciya drevesnyh nasazhdenij urbanizirovannyh territorij s ispol'zovaniem smartfona* [Tree inventory in urban areas using smartphone]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal]. 2023; 3(51): 56-70. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5

29. Sandim A., Amaro M., Silva M.E., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Lousada J.L., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. Forests. 2023; 14: 1553. – DOI: https://doi.org/10.3390/f14081553

30. Schweizer D., Cole R.J., Werden L.K., Cedeño G.Q., Rodriguez D., Navarro K., Esquivel J.M., Max S., Chiriboga F.E., Zahawi R.A., Holl K.D., Crowther T.W. Review and assessment of smartphone apps for forest restoration monitoring. Restor Ecol. 2024; 32: e14136. – DOI: https://doi.org/10.1111/rec.14136

31. Lebedev A.V., Krinitsyn I.G., Gostev V.V. Taksonomicheskaya struktura flory sosudistyh rastenij zapovednika "Kologrivskij les" [Taxonomical structure of the flora of vascular plants of the Forest Nature Reserve "Kologrivsky Les"]. Prirodoobustrojstvo. 2022; 3: 115-121. – DOI: https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-3-115-121

32. Lebedev A.V. New generalised height-diameter models for the birch stands in European Russia. Baltic Forestry. 2020; 26(2): 1-7. – DOI: https://doi.org/10.46490/BF499

33. Prilepsky N.G. *Rastitel'nyj pokrov severo-vostoka Kostromskoj oblasti (bassejna r. Vohmy)* [Vegetation cover of the north-east of the Kostroma region (Vokhma river basin)]: thesis of a dissertation for the degree of candidate of biological sciences. Moscow, 1993; 20 p. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30221365

Сведения об авторах

✉ *Лебедев Александр Вячеславович* – доктор с.-х. наук, доцент, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434; научный сотрудник, ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кологривский лес» имени М.Г. Синицына», ул. Некрасова, 48, г. Кологрив, Костромская обл., Российская Федерация, 157440, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8939-942X, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru

Information about the authors

✉ *Aleksandr V. Lebedev* – DSci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Land Organization and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, Russian Federation, 127434; Researcher, Kologrivsky Forest Nature Reserve, Nekrasova st., 48, Kologriv town, Kostroma region, Russian Federation, 157440, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8939-942X, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/9
УДК 630*232.312.3 + 630*232.323.7) : 630*232.32

Сравнительный анализ хвойных древостоев регионов Северной Евразии в рамках эколого-физиологической модели

Виктор И. Лисицын[1] ✉, viktor-lisicyn@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2148-1988
Николай Н. Матвеев[1], nmtv@vglta.vrn.ru, https://orcid.org/0000-0001-9195-9580
Наталья Ю. Евсикова[1], natalyaevsikova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5288-0140
Нина С. Камалова[1], rcamel@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8293-8593

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

В настоящей работе проведен анализ расчетов динамики роста хвойных древостоев регионов Евразии с использованием разработанной ранее авторами эколого-физиологической модели (ЭФМ). Эта модель термодинамически обоснованна и содержит четыре параметра, которые определяются с помощью процедуры оптимизации и имеют, как правило, «эколого-физиологический» смысл. В модели в качестве эмпирических данных используются таблицы хода роста (ТХР) биопродуктивности насаждений. В отличие от ранних работ авторов, в которых для обоснования модели были использованы обобщенные данные биопродуктивности древостоев, в предлагаемой работе для исследования влияния географии произрастания хвойных древостоев на динамику роста применяются местные таблицы хода роста (ТХР) различных регионов. Всего рассмотрено 53 хвойных древостоя первого класса бонитета, из которых 25 ТХР естественных древостоев сосны (*Pinus sylvestris*), 18 ТХР естественных и культурных насаждений ели (*Picea abies*) и 10 ТХР естественных и культурных насаждений лиственницы (*Larix*). В рамках ЭФМ показано, что параметр модели, характеризующий удельную скорость расхода ресурса при росте деревьев, не зависит ни от географии региона, ни от породы древостоя, а является характеристикой бонитета насаждения. Тогда как второй параметр модели, выражающий связь площади поверхности древостоя с его биомассой, постоянен только в пределах данной породы, что указывает на принадлежность данного насаждения к определенной породе. То есть параметры эколого-физиологической модели не только имеют ясный «физический» смысл, но и являются обобщенными характеристиками древостоя, которые определяют и бонитет насаждения, и его породу. Из термодинамического обоснования применяемой ЭФМ следует обоснованность используемых параметров модели, которые, в свою очередь, дают термодинамическое обоснование широко применяемой в практике лесоведения бонитетной шкале.

Ключевые слова: *эколого-физиологическая модель, параметры модели q и r, местные таблицы хода роста, бонитетная шкала, сосна обыкновенная, Pinus Sylvestris* L., *ель европейская, Picea Abies* L., *лиственница, Larix*

Финансирование: исследование проведено в рамках работы по теме «Влияние условий произрастания древесной растительности на термодинамические характеристики древостоев», поддержанной локальным грантом ФГБОУ ВО ВГЛТУ в 2025 г.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи, членов Научно-технического Совета ФГБОУ ВО ВГЛТУ и лично проректора по науке и инновациям профессора С.С. Морковину за поддержку исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сравнительный анализ хвойных древостоев регионов Северной Евразии в рамках эколого-физиологической модели / В.И. Лисицын, Н.Н. Матвеев, Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 146-161. – *Библиогр.: с. 159-161 (15 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/9.

Поступила 10.06.2025. ***Пересмотрена*** 07.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Comparative analysis of the Northern Eurasia regions coniferous forest stands within the framework of the ecological-physiological model

Victor I. Lisitsyn[1] ✉, viktor-lisicyn@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2148-1988
Nikolay N. Matveev[1], nmtv@vglta.vrn.ru, https://orcid.org/0000-0001-9195-9580
Natalia Yu. Evsikova[1], natalyaevsikova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5288-0140
Nina S. Kamalova[1], rcamel@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8293-8593

[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

This paper analyzes estimates of coniferous forest growth dynamics in Eurasian regions using an ecological-physiological model (EPM) previously developed by the authors. This model is thermodynamically sound and contains four parameters determined through an optimization procedure and typically have an ecological-physiological meaning. The model utilizes growth progression tables (GPTs) of stand bioproductivity as empirical data. Unlike the authors' earlier studies, which used generalized stand bioproductivity data to validate the model, this paper utilizes local growth progression tables (GPTs) from various regions to study the influence of coniferous forest stand geography on growth dynamics. A total of 53 first-class coniferous stands were examined, including 25 natural pine (Pinus sylvestris) stands, 18 natural and cultivated spruce (Picea abies) stands, and 10 natural and cultivated larch (Larix) stands. The EFM demonstrated that the model parameter characterizing the specific rate of resource consumption during tree growth is independent of both regional geography and stand species, but is a characteristic of the stand's forest quality. The second model parameter, expressing the relationship between stand surface area and biomass, is constant only within a given species, indicating the stand's affiliation with a specific species. This means that the parameters of the ecological-physiological model not only have a clear "physical" meaning but also serve as generalized stand characteristics that determine both the stand's forest quality and its species. The thermodynamic justification of the applied EFM demonstrates the validity of the model parameters, which, in turn, provide a thermodynamic justification for the bonitet scale widely used in forestry practice.

Keywords: *ecological-physiological model, model parameters q and r, local growth tables, bonitet scale, Scots pine, Pinus Sylvestris L., Norway spruce, Picea Abies L., larch, Larix*

Funding: the study was carried out as part of work on the topic “The influence of the conditions for the growth of wood vegetation on the thermodynamic characteristics of the tree stands”, supported by the local grant of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov in 2025.

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of the article, members of the Scientific and Technical Council of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov and personally vice-rector for science and innovation of Professor S.S. Morkovina for research support.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Evsikova N.Yu., Kamalova N.S. (2025) Comparative analysis of the Northern Eurasia regions coniferous forest stands within the framework of the ecological-physiological model. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 146-161 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/9.

Received 10.06.2025. ***Revised*** 07.10.2025. ***Accepted*** 30.11. 2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Большое разнообразие отличающихся по теоретическому подходу и внутреннему содержанию существующих в настоящее время моделей роста древостоев можно разделить на две группы: эмпирические модели (ЭМ) и теоретические модели[8]. В теоретическом моделировании выделим особую группу – эколого-физиологические модели (ЭФМ) [1]. Выбор той или иной модели зависит от многих факторов: во-первых, от целей, поставленных перед исследователем; во-вторых, от требуемой точности воспроизведения эмпирических данных; в-третьих, от возможности прогнозировать динамику древостоя и мн. др.

Достоинством ЭМ моделей являются [2-4]:

1) простота использования для нужд практического лесоводства;

2) достаточно высокая точность воспроизведения эмпирических данных;

3) возможность прогноза развития данного древостоя в течение определенного временного интервала (порядка 20 лет, см. [5]);

4) возможность моделирования динамики древостоя после частичной гибели, вызванной прореживанием и т.д. [2, 6].

Достоинства ЭФМ следующие:

1) параметры модели q и r имеют ясный эколого-физиологический смысл;

2) значения параметров могут характеризовать вид древостоя, породу дерева, бонитет насаждения, тип растительности;

3) точность воспроизведения эмпирических данных у современных ЭФМ приблизительно равна точности ЭМ [5].

К недостаткам модели, которые затрудняют широкое использование ЭФМ в практическом лесоводстве можно отнести:

а) необходимость использовать математический аппарат, применяемом для решения дифференциальных уравнений, владеть дифференциальным и интегральным исчислением;

б) знакомство с элементами системного анализа для проведения процедуры оптимизации, в которой используются модели многокритериального принятия решений на основе принципов оптимальности[9].

Однако эти недостатки скорее являются продолжением достоинств ЭФМ. Краткий обзор современного состояния использования ЭФМ можно найти в работе М Д Корзухина [7], где применялось уравнение Берталенффи для построения кривых хода роста[10]..

В работах [8, 11] ЭФМ использовалась для древостоев, таблицы хода роста (ТХР) и биопродуктивности которых были обобщены А.З. Швиденко [10] до уровня крупных регионов. В таком случае невозможно учесть влияние на полученные параметры ЭФМ климатических особенностей и географического расположения областей произрастания древостоев. Поскольку результаты работы [11] привязываются к климату и географии регионов, было бы более корректным применение локальных (местных) таблиц, данные которых, в том числе и для биопродуктивности

[8] Pretzsch H. Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model. Berlin: Springer-Verlag, 2009; XIX: 664. ISBN 978-3-642-14861-3.

[9] Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 608 с.

[10] Bertalanffy L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts. Braunschweig: Vieweg, 1953; 60.

насаждений, приведены в монографиях В.А. Усольцева[11] [12]. В этом случае важно получить не только значения параметров ЭФМ, но и исследовать их зависимость от конкретного региона, а также от укрупненных областей, содержащих мелкие регионы с близкими природными условиями.

Целью настоящей работы является доказательство инвариантности параметров модели q и r относительно географии регионов произрастания насаждений для хвойных древостоев первого бонитета.

Выбор первого бонитета обусловлен прежде всего тем фактом, что данный класс бонитета представлен практически во всех регионах Евразии для хвойных пород. Очень важной особенностью данной работы считаем нахождение общих характеристик древостоя в виде констант модели как для бонитета насаждения, так и для породы. Константы в моделировании имеют принципиальный характер[12] и важны при построении как ЭФМ, так и ЭМ. В качестве базовых исходных эмпирических данных в настоящей работе нами были использованы таблицы биологической продуктивности, полученные В.А. Усольцевым на основе локальных ТХР [12].

Материалы и методы

1. Принципы построения ТХР

В разработанной нами ЭФМ [1, 8, 9] актуальным является возраст древостоя t_{max}, при котором биомасса насаждения достигает максимального значения. Это время установления в лесной экосистеме стационарного процесса [1, 8, 11], который может быть достаточно продолжительным. Биологический смысл пика биомассы заключается в «климаксном» состоянии развития биологических объектов системы [13], когда баланс роста и отмирания стремится к нулю, а ключевые элементы насаждения – деревья, как высшие вегетирующие растения, достигают возраста биологической зрелости (спелости) [14].

Параметры ЭФМ рассчитываются в результате процесса многокритериальной оптимизации[13] с использованием стандартного критерия Нэша-Сатклиффа[14] с учетом минимума относительного отклонения эмпирических значений от рассчитанных для всего временного интервала, который приведен для них в ТХР. При этом в процессе оптимизации необходимо разделять варьируемые параметры модели на остающиеся неизменными (константами) и на изменяемые переменные.

Следует особо остановиться на принципах работы бонитетной шкалы и принципах построения ТХР. Наши соображения следующие:

- наиболее точным, как утверждается в практическом руководстве по таксации, является исторический метод построения ТХР, но он, как правило, не используется [15], так как лес растет долго по сравнению с отрезком времени, начиная с которого проводятся регулярные таксационные измерения;

реально применяют другие методы построения ТХР, к которым относятся метод указательных насаждений (аналитический) Гартинга, метод полосок (статистический) Баура, метод повторных перечетов (комбинированный) Гейера, метод ЦНИИЛХ и др. Каждый из перечисленных методов имеет как положительные стороны, так и недостатки. Применение того или иного метода зависит от целей исследования, квалификации исследователя, имеющихся у него ресурсов и т.д.

Логично предположить, что теоретическим обоснованием методов построения ТХР является эргодическая гипотеза, согласно которой среднее

[11] Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 762 с. – URL: http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302).

[12] Рогозин М.В., Разин Г.С. Модели динамики и моделирование развития древостоев // Сибирский лесной журнал. – 2015. – № 2. – С. 55-70. – DOI: 10.15372/sjfs20150205.

[13] Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 608 с.

[14] Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. J. Hydrology. 1970; 10 (3): 282-290. – DOI: https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6.

значение физической величины по времени равняется среднему значению по ансамблю. Строго говоря, эргодическая гипотеза справедлива для замкнутых систем[15], физические величины в которых могут быть описаны микроканоническим распределением, точнее микроканоническим для изолированной системы, каноническим или большим каноническим для открытой системы. Безусловно, эргодическую гипотезу нельзя использовать для объяснения процессов, происходящих в сложных лесных экосистемах, но если достаточно длительное время поддерживается стационарный режим [7], то гипотеза может качественно пояснить основные моменты построения ТХР, тогда исторический метод будет представлять собой усреднение физических величин (таксационных показателей) по времени, тогда как любой из альтернативных методов претендует на среднее значение физической величины (таксационного показателя) по ансамблю. Составление ТХР производится в большинстве случаев в рамках бонитетной шкалы, которой мы придерживаемся в данной работе. При этом не будем вдаваться в подробности методов получения локальных ТХР, которые были использованы В.А. Усольцевым для расчета таблиц биопродуктивности соответствующих регионов. Нами были взяты данные биопродуктивности для 12 естественных древостоев сосны (Pinus sylvestris), 8 естественных и культурных насаждений ели (Picea abies) и 7 естественных и культурных насаждений лиственницы (Larix).

2. Основные положения ЭФМ

Прежде, чем привести результаты расчетов характеристик ЭФМ, опишем основные моменты ее получения [1, 9]. Как уже указывалось выше, основой модели является установление времени достижения максимального значения биомассы насаждения t_{max}. Иногда в указанных выше монографиях данные о t_{max} в ТХР отсутствовали. В таких случаях значения t_{max} были получены нами квадратичной экстраполяцией данных о самых больших показателях биомассы при соответствующих значениях времени, так как они имели вид функции от времени, которая стремится к максимуму. Экстраполяция считается обоснованной, если она дает значение функции, выходящее за пределы экстраполирования на величину порядка временного «шага». Мы сочли возможным распространить экстраполяцию до трех временных шагов. Эти древостои в таблицах отмечены (*) и приведены в качестве примеров, в которых наблюдается инвариантность параметров модели q и r относительно разных регионов произрастания. Параметры модели определяются ниже.

- Среднее значение биомассы одного дерева m считается по формуле m = M / N, где M и N – биомасса древостоя и число деревьев на гектар в один и тот же момент времени, соответственно. Для расчета биомассы отдельного дерева используется балансовое уравнение Берталанффи [16]:
- $\frac{dm}{dt} = fgm^q - rm.$ (1)

В уравнении (1) f – удельная скорость поглощения ресурса; r – удельная скорость расхода ресурса; g и q – аллотропические параметры модели, которые выражают связь биомассы с поверхностью особи. Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$m(t) = m_\infty\left(1 + b\exp(-at)\right)^p, \quad (2)$$

где $b = \left(\frac{m_0}{m_\infty}\right)^{1-q} - 1$; a = r(1 – q); p = 1/(1 – q).

Для оценки числа деревьев на гектар нами было получено следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left(f_1 g_1 m_1^{q_1 - 1} - r_1\right)N, \quad (3)$$

где f_1, g_1, q_1, r_1 – параметры, имеющие смысл, аналогичный соответствующим параметрам уравнения (1); m_1 – функция, зависящая от времени и удовлетворяющая уравнению (1) с измененными параметрами в (3). Решение уравнения (3) имеет вид:

[15] Математическая энциклопедия: Гл. ред. И.М. Виноградов, Т. 5. – Москва: Советская энциклопедия, 1984. – С. 1011.

[16] Bertalanffy L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts. Braunschweig: Vieweg, 1953; 60.

- $N(t) = N_0 \frac{(1+b_1)^{p_1}}{(1+b_1 \exp(-a_1 t))^{p_1}}$, (4)
- где $b_1 = \left(\frac{N_\infty}{N_0}\right) - 1$; $a_1 = r_1(1 - q_1)$; $p_1 = 1/(1 - q_1)$.

Параметры модели b_1 и b определяются из начальных (m_0, N_0) и конечных значений (m_∞, N_∞). Начальные значения (m_0, N_0), согласно [3], берутся из ТХР, а конечные значения (m_∞, N_∞) подлежат определению в результате процедуры оптимизации. По этой же процедуре находятся и значения параметров q и r. В результате мы имеем 4 независимых параметра для определения функций $m(t)$ и $N(t)$.

Оптимизация в данной работе выполняется в несколько этапов. На первом этапе неизвестные параметры разбиваются на два уровня: а) q и r, б) (m_∞, N_∞). Далее с помощью критерия Нэша-Сатклиффа[17] M_m, M_N, M_M биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар и биомассы древостоя в целом, соответственно, определятся «овражный» тип функций $M_m(q,r)$ и $M_N(q,r)$ при фиксированных значениях второй группы параметров (m_∞, N_∞). В качестве конкретного примера приводим расчеты, используя ТХР максимально продуктивных сосняков Воронежскаой обл. и др. обл. ЦЧР. Задаем уровень значений функций $M_m(q,r)$ и $M_N(q,r)$ равным 0.995 и определяем значения параметра q на «верхней» qN_1 и нижней строне qN_2 оврага для критерия $M_N(q,r)$ и q_{M1} и q_{M2} для критерия $M_m(q,r)$, соответственно, при конкретном значении параметра r (см. Табл. 1).

Таблица 1

Значения параметров q и r при уровне функций $M_m(q,r)$ и $M_N(q,r)$ равном 0.995

Table 1

Values of q and r parameters at the function levels $M_m(q,r)$ and $M_N(q,r)$ are equal to 0.995

q_{N1}	q_{N2}	q_{M1}	q_{M2}	r
0.6477	0.6177	0.6444	0.6345	0.03
0.7122	0.6845	0.7094	0.6973	0.04
0.7513	0.7316	0.75292	0.7417	0.05
0.78858	0.7662	0.7845	0.77471	0.06
0.8132	0.7929	0.8087	0/80016	0.07

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

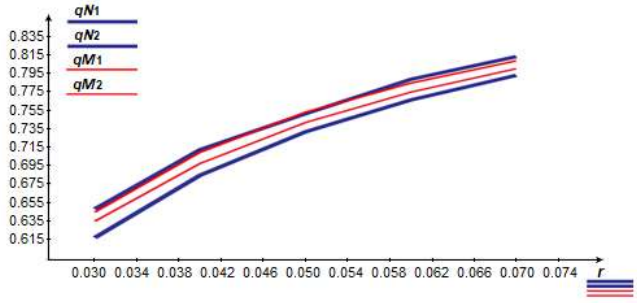


Рисунок 1. Форма «оврага» при уровне критериев 0.995. Красные кривые – «овраг» для критерия M_m, синие – для критерия M_N

Figure 1. The shape of the “ravine” at the criterion level of 0.995. Red curves are the “ravine” for the M_m criterion, blue ones are for the M_N criterion.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author’s composition

[17] Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. J. Hydrology. 1970; 10 (3): 282-290. – DOI: https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

На рисунке 1 приведена форма «оврага» для отыскания оптимальных значений параметров модели. Видно, что «овраги» идут подобно и красный «овраг» содержится в синем. Это говорит об одинаковом влиянии соответствующих критериев на результат оптимизации. На втором этапе в процесс оптимизации включается вторая пара параметров $(\mathbf{m}_\infty, \mathbf{N}_\infty)$. Для этих параметров существует очевидное ограничение $M_\infty < M(t_{max})$. В данном случае M – общая биомасса древостоя в конкретный момент времени Овражный тип предопределил метод оптимизации как метод случайного поиска. Для первой группы параметров были получены значения $q = 0.748$ и $r = 0.05$. Значения находились по следующему алгоритму: для значений m_∞ и N_∞ определялся уровень $M_\infty = m_\infty$ и N_∞, равный приблизительно 270 т/га. Изменяя число деревьев на гектар (для него также существует естественное ограничение $N < N(t_{max})$ и биомассу отдельного дерева, произведение которых нам приблизительно известны, находим параметры m_∞ и N_∞, которые соответствуют максимальному значению критерия Нэша-Сатклиффа для общей биомассы насаждения M_M. Результаты этих расчетов приведены в таблице 2.

Определив на первых двух этапах значения параметров модели, на третьем этапе находится точность полученных параметров, используя многокритериальный анализ, применяемый в системном анализе[18]. Мы использовали для определения точности полученных значений параметров модели q = 0.748 и r = 0.05 шесть критериев (метрик качества [5]). (Для второй пары параметров процедура определения точности не проводилась). Три критерия Нэша-Сатклиффа M_m, M_N, M_M биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар и биомассы древостоя в целом, соответственно, три величины среднего значения абсолютной ошибки в процентах ΔN_{cp}, ΔM_{cp}, Δm_{cp}. Вес каждого критерия определяется по возрастанию критерия Нэша-Сатклиффа для первых трех критериев и по убыванию среднего значения абсолютной ошибки для следующих трех критериев. Точность определения $\varepsilon_1 = 0.02$ для параметра q и $\varepsilon_2 = 0.002$ для параметра r. Тогда для сравнения мы включаем 9 пар значений параметра. Шкала весов определяется из интервала 1-9 для каждого критерия. Оптимальной считается пара значений параметров, получившая наибольший суммарный вес. Соответствующие расчеты приведены в таблице 3

Таким образом, по итогам многокритеральной процедуры оптимизации (см. Табл. 3) получены следующие значения параметров: $q = 0.748$ с точностью $\varepsilon_1 = 0.02$, $r = 0.05$ с точностью $\varepsilon_2 = 0.002$, $m_\infty = 1.43$ тонны, $N_\infty = 190$ 1/га.

Таблица 2

Зависимость критерия Нэша-Сатклиффа от второй группы параметров $(\mathbf{m}_\infty, \mathbf{N}_\infty)$

Table 2

Dependence of the Nash-Sutcliffe criterion on the second group of parameters (m_∞,N_∞)

M_M	m_∞, тонн	N_∞, 1/га	M_∞, тонн/га
0.9855	1.674	160	267.8
0.987	1.59	170	270.3
0.988	1.5	180	270.0
0.990	1.43	190	271.7
0.989	1.358	200	271.6
0.988	1.298	210	272.58

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

[18] Рыков А. С. Системным анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. — М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. — 608 с.

Таблица 3

Определение оптимальной пары параметров с помощью многокритериальной процедуры оптимизации

Table 3

Determining the optimal pair of parameters using a multi-criteria optimization procedure

N п/п	q	r	M_N	Вес M_N	M_M	Вес M_M	M_m	Вес M_m	ΔN_{cp}	Вес ΔN_{cp}	ΔM_{cp}	Вес ΔM_{cp}	Δm_{cp}	Вес Δm_{cp}	Σ вес
1	0.748	0.05	0.9994	7	0.990	5	0.9995	9	2.18	7	4.49	5	3.05	9	42
2	0.75	0.05	0.9989	5	0.9891	6	0.9985	7	2.90	6	4.22	6	3.56	7	37
3	0.746	0.05	0.9997	8.5	0.9866	4	0.9993	8	1.71	9	4.77	4	3.46	8	41.5
4	0.748	0.048	0.9956	2	0.9907	8	0.9901	3	6.28	2	3.85	8	5.23	5	28
5	0.748	0.052	0.9993	6	0.9846	2	0.9931	4	3.22	5	5.12	2	7.10	2	21
6	0.75	0.052	0.9997	8.5	0.9860	3	9965	6	2.14	8	4.84	3	5.58	4	32.5
7	0.75	0.048	0.9938	1	0.9917	9	0.9851	1	7.62	1	3.58	9	5.97	3	24
8	0.746	0.048	0.9970	3	0.9896	7	0.9940	5	4.98	3	4.12	7	4.69	6	31
9	0.746	0.052	0.9987	4	0.9832	1	0.9884	2	4.34	4	5.40	1	8.62	1	13

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных расчетов параметров ЭФМ сведены в Таблицы 4 – 6. В Таблице 4 представлены показатели для естественных сосняков Центра Европейской части России, Белоруссии и некоторых стран Западной Европы, Урала, Сибирских регионов РФ и регионов Казахстана. Показатели для естественных и культурных насаждений ели регионов России и Казахстана приводятся в Таблице 5, для естественных лиственничников регионов России – в Таблице 6.

Во 2 – 11 столбцах всех таблиц последовательно указаны: а) регион произрастания насаждения; б) тип древостоя сосны, автор ТХР и год получения ТХР (эти сведения полностью соответствуют данным монографии [8]); в) значения варьируемых параметров m_∞, N_∞, q, r, возраст древостоя t_{max}, при котором достигается максимальная биомасса насаждения, значения критерия Нэша-Сатклиффа[19] M_m, M_N, M_M для рассчитанных значений биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар и биомассы древостоя в целом, соответственно.

В столбцах с четвертого по седьмой всех таблиц приведены полученные в процессе оптимизации значения варьируемых параметров ЭФМ: q – аллотропический параметр, позволяющий выразить площадь насаждения через биомассу; r – удельная скорость расхода ресурса; m_∞ – биомасса среднего дерева; N_∞ – число деревьев на гектар. Значения параметров m_∞ и N_∞ приняты как предельные для данного древостоя. Они изменяются в достаточно большом интервале для разных

[19] Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. J. Hydrology. 1970; 10 (3): 282-290. – DOI: https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6.

насаждений данного бонитета, как, впрочем, и соответствующие им начальные значения, которые берутся из ТХР. Значения параметров q и r, напротив, демонстрируют постоянство как в пределах породы (параметр q), так и в пределах данного бонитета (параметр r). Отсюда делаем важный вывод, что определяющий связь биомассы насаждения и площади поверхности параметр q, может являться характеристикой породы древостоя, а параметр r может претендовать на характеристику бонитета насаждения. Именно, в этом проявляется основное достоинство эколого-физиологической модели, параметры которой не только имеют ясный физический смысл, но и содержат обобщенный смысл в качестве характерных признаков древостоя.

В восьмом столбце таблиц даны значения времени древостоя t_{max}, при котором биомасса насаждения достигают максимального значения. Они очень различаются по величине, и зачастую в процессе аппроксимации выходят за пределы интервала значений, которые даны в ТХР. Если значения t_{max} превышают порядок двух десятков лет, то точность расчетов снижается, особенно для величины общей биомассы M (см. критерий, Нэша-Сатклиффа, приведенный в последнем столбце Таблиц 4 – 6).

Столбцы с девятого по одиннадцатый несут информацию о значениях критерия Нэша-Сатклиффа, который является одним из критериев оптимальности соответствия рассчитанных значений биомассы отдельного дерева m, числа деревьев на гектар N и общей биомассы древостоя M. Кроме того, среднее абсолютное отклонение рассчитанных значений биомассы отдельного дерева m, числа деревьев на гектар N и общей биомассы древостоя M от соответствующих эмпирического, приведенных в ТХР. Как известно, близость критерия Нэша-Сатклиффа к 1 означает оптимальное согласие модели с экспериментом. Значение критерия в 0.99 дает для относительного отклонения величину, не превышающую 5 % для всего временного интервала изменения m, N и M от начального до максимального, представленного в соответствующей ТХР (см. также таблицу 3).

Таблица 4

Сосновые естественные насаждения. Результаты расчетов параметров ЭФМ и значения критерия Нэша-Сатклиффа

Table 4

Natural Pine Plantations. Results of Calculations of the EFM Parameters and the Values of the Nash-Sutcliffe Criterion

№ п/п | Item No.	Регион | Region	Тип древостоя, автор ТХР, год получения | Type of tree stand, author of GCT, year of receipt	m_∞, *тонн* | m_∞, *tons*	N_∞, 1/*га* | N_∞, 1/*ha*	q	r	t_{max}, *лет* | t_{max}, *years*	M_m	M_N	M_M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Московская обл. | Moscow region	(*)Сомкнутые сосняки, Козловский, 1967 | Closed pine forests, Kozlovsky, 1967	1.71	180	0.75	0.05	162	0.989	0.990	0.969
2	Воронежская обл. и др. обл. ЦЧР | Voronezh region and other regions of the Central Chernozem region	Максимально продуктивные сосняки, Кирюков, 1982 | Maximum productive pine forests, Kiryukov, 1982	1.43	1970	0.748	0.05	140	0.999	0.999	0.990

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	Белоруссия | Belarus	Модальные сосняки, орликовый и черничные типы, Багинский, 1984 | Modal pine forests, orlikovoe and bilberry types, Baginsky, 1984	2.42	75	0.75	0,05	135	0.998	0.992	0.997
4	Европейская Россия, Южная тайга | European Russia, Southern Taiga	Смешанные леса, модальные сосняки, Швиденко и др., 1996 | Mixed forests, modal pine forests, Shvidenko et al., 1996	2.3	72	0.75	0.05	140	0.999	0.996	0.998
5	Швеция | Sweden	Нормальные сосняки, Maas, 1911, цит. по Орлову, 1928 | Normal pine forests, Maas, 1911, cited by Orlov, 1928	1.05	280	0.75	0.045	180	0.979	0.992	0.965
6	Северо-Германская низменность | North German Plain	Нормальные сосняки, Schwappach, 1896, цит. по Орлову, 1928 | Normal pine forests, Schwappach, 1896, cited by Orlov, 1928	3.5	164	0.8	0.05	172	0.989	0.996	0.994
7	Германия | Germany	Нормальные сосняки при умеренном разреживании, Wiedemann, Schober, 1957 | Normal pine forests under moderate thinning, Wiedemann, Schober, 1957	2.4	101	0.75	0.05	143	0.996	0.988	0.987
8	Средний Урал | Middle Urals	Сосняки припышминских боров, Чудников, Козловский и др.,1955 | Pine forests of the Pyshma pine forests, Chudnikov, Kozlovsky et al., 1955	1.3	315	0.75	0.05	150	0.977	0.999	0.978
9	Средний Урал | Middle Urals	(*)Сомкнутые сосняки, Милованович, 1967 | Closed pine forests, Milovanovic, 1967	1.7	175	0.75	0.05	281	0.992	0.999	0.992
10	Казахстан | Kazakhstan	Казахский мелкосопочник, нормальные сосняки, Швиденко, 1996 | Kazakh low hills, normal pine forests, Shvidenko, 1996	1.36	250	0.75	0.05	180	0.980	0.966	0.977

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	Западная Сибирь | Western Siberia	Средняя и южная тайга, нормальные сосняки, Швиденко, 1996 | Middle and southern taiga, normal pine forests, Shvidenko, 1996	1.62	165	0.75	0.05	190	0.993	0.982	0.982
12	Казахстанское Прииртышье | Kazakhstan's Irtysh region	Ленточные боры, нормальные сосняки, Швиденко, 1996 | Ribbon pine forests, normal pine forests, Shvidenko, 1996	0.93	303	0.7	0.051	160	0.967	0.982	0.990

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 5

Еловые естественные и культурные насаждения. Результаты расчетов параметров ЭФМ и значения критерия Нэша-Сатклиффа для регионов России, Белоруссии и Киргизии

Table 5

Spruce Natural and Cultivated Plantations. Results of Calculations of the EFM Parameters and the Values of the Nash-Sutcliffe Criterion for the Regions of Russia, Belarus and Kyrgyzstan

№ п/п | Item No.	Регион | Region	Тип древостоя, автор ТХР, год получения | Type of tree stand, author of GCT, year of receipt	m_∞, *тонн* | m_∞, *tons*	N_∞, 1/*га* | N_∞, 1/*ha*	q	r	t_{max}, *лет* | t_{max}, *years*	M_m	M_N	M_M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Северо-Восток Европейской России (Коми) | North-East of European Russia (Komi)	Сомкнутые смешанные ельники с пихтой и березой, 1967 | Closed mixed spruce forests with fir and birch, 1967	0.75	310	0.68	0.05	114	0.992	0.993	0.990
2	Северный Тянь-Шань | Northern Tien Shan	Сомкнутые древостои ели Шренка, Харитонов, 1987 | Closed stands of Shrenk's spruce, Kharitonov, 1987	1.49	383	0.68	0.049	250	0.995	0.996	0.931
3	Московская обл. | Moscow region	(*) Культуры ели, Козловский, Павлов, 1967 | Spruce cultures, Kozlovsky, Pavlov, 1967	0.75	385	0.68	0.05	116	0.980	0.976	0.972

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	Центральные и Юго-Восточные районы Европейской России | Central and South-Eastern regions of European Russia	(*) Культуры ели, Моисеев, 1971 | Spruce cultures, Moiseev, 1971	0.6	523	0.68	0.05	110	0.996	0.990	0.976
5	Белоруссия | Belarus	Модальные ельники, черничный и орликовый типы, Багинский, 1984 | Modal spruce forests, blueberry and orlik types, Baginsky, 1984	1.38	140	0.68	0.05	130	0.992	0.994	0.983
6	Ленинградская обл. | Leningrad region	Модальные ельники, кисличный тип, Третьяков и др., 1965 | Modal spruce forests, wood sorrel type, Tretyakov et al., 1965	0.76	170	0.68	0.05	83	0.984	0.999	0.941
7	Среднее Поволжье | Middle Volga region	(*) Смешанные сомкнутые ельники, Моисеев, 1971 | Mixed closed spruce forests, Moiseev, 1971	1.2	240	0.68	0.05	151	0.999	0.999	0.936
8	Белоруссия | Belarus	(*) Нормальные ельники, Багинский, Моисеенко, 1984 | Normal spruce forests, Baginsky, Moiseenko, 1984	0.9	365	0.68	0.05	178	0.993	0.997	0.935

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 6

Лиственничные естественные и культурные насаждения. Результаты расчетов параметров ЭФМ и значения критерия Нэша-Сатклиффа для регионов Центральной России и Европы

Table 6

Natural and Cultivated Larch Stands. Results of Calculations of the EFM Parameters and the Values of the Nash-Sutcliffe Criterion for the Regions of Central Russia and Europe

№ п/п | Item No.	Регион | Region	Тип древостоя, автор ТХР, год получения | Type of tree stand, author of GCT, year of receipt	m_∞, *тонн* | m_∞, *tons*	N_∞, 1/*га* | N_∞, 1/*ha*	q	r	t_{max}, *лет* | t_{max}, *years*	M_m	M_N	M_M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Дальний Восток | Far East	(*)Нормальные лиственничники, Корякин и др., 1982, густота 3 | Normal larch forests, Koryakin et al., 1982, density 3	2.10	205	0.73	0,05	137	0.992	0.995	0.959
2	Хабаровский край | Khabarovsk Krai	Модальные лиственничники, Корякин и др., 1982 | Modal larch forests, Koryakin et al., 1982	1.87	112	0.73	0.05	186	0.990	0.990	0.991
3	Южный район Красноярского края | Southern region of Krasnoyarsk Krai	Модальные лиственничники, Фалалеев, Поляков, 1969 | Modal larch forests, Falaleev, Polyakov, 1969	1.6	235	0.75	0.05	202	0.996	0.993	0.996
4	Западные Саяны Сомкнутые | Western Sayan Mountains Closed	(*) Сомкнутые лиственничники, В/О «Леспроект», 1975 | Closed larch forests, All-Union Association "Lesproekt", 1975	1.82	225	0.73	0.05	221	0.993	0.988	0.967
5	Архангельская область | Arkhangelsk region	Сомкнутые чистые естественные лиственничники, Молчанов, 1971 | Closed pure natural larch forests, Molchanov, 1971	1.45	406	0.74	0.03	226	0.993	0.995	0.987
6	Всеобщие для Сибири | General for Siberia	Нормальные лиственничники, Фалалеев, 1985 | Normal larch forests, Falaleev, 1985 |	1.43	360	0.73	0.05	283	0.990	0.945	0.975
7	Река Ангара, среднее и южное течение | Angara River, middle and southern reaches	Модальные лиственничники, Фалалеев, Поляков, 1969 | Modal larch forests, Falaleev, Polyakov, 1969	1.89	208	0.74	0.05	222	0.997	0.995	0.953

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Выводы

Анализируя данные расчетов, можно сделать следующие выводы:

1. ЭФМ, может быть применена для описания динамики хода роста, которая представлена местными ТХР.
2. Географическое положение регионов и типология леса практически не оказывают влияния на значения параметров ЭФМ r и q.
3. Использование ЭФМ для расчета характеристик ТХР установило, что параметр r не зависит от типологии леса и географического расположения региона и может характеризоваться как признак

бонитета насаждения, если будут проведены исследования для других бонитетов. Можно с известной долей вероятности утверждать, что результаты, полученные непосредственно при использовании ЭФМ, также термодинамически обоснованны.

4. Отсутствие зависимости в поведении параметров m_∞ и N_∞ от региона вполне объяснимо, так как экспериментальные данные о биомассе насаждений и числе деревьев на гектар для любого бонитета, в том числе и для первого, сильно отличаются в разных регионах.

Необходимо продолжить исследования в выбранном направлении для подтверждения полученных закономерностей для других, прежде всего лиственных, пород, имеющих большое значение в решении многих проблем как лесоводческого характера, так и общеэкологического (например, карбоновой проблемы).

Список литературы

1. Лисицын В.И., Драпалюк М.В., Матвеев Н.Н. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – Т. 3 (387). – С. 213-225. – DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225.
2. Kazimirović M., Stajić B., Petrović N., Ljubičić J., Košanin O., Hanewinkel M., Sperlich D. Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (Quercus robur L.) stands: explicit mapping of site index classification in Serbia. Annals of Forest Science. 2024; 81: 15. – DOI: https://doi.org/10.1186/s13595-024-01231-0.
3. Kuehne C., McLean J.P., Maleki K., Antón-Fernández C., Astrup R. A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned even-aged Scots pine forests in Norway. Silva Fennica. 2022; 56 (1): 10627. – DOI: https://doi.org/10.14214/sf.10627.
4. Maleki K., Astrup R., Kuehne C., McLean J.P., Antón-Fernández C. Stand-level growth models for long-term projections of the main species groups in Norway. Scandinavian Journal of Forest Research. 2022: 37(2): 130–143. – DOI: https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2056632.
5. Лебедев А.В. Динамическая модель роста и производительности сосновых древостоев (Pinus sylvestris L.) Унженской низменности // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3 (55). – С. 127-151. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8.
6. Li C., Barclay H., Huang S., Roitberg B., Lalonde R., Xu W., Chen Y. Modelling the stand dynamics after a thinning induced partial mortality: A compensatory growth perspective. Front. Plant Sci. 2022; 13: 1044637. – DOI: 10.3389/fpls.2022.1044637.
7. Корзухин М.Д. Построение кривых хода роста древостоев на основе обобщенной модели Берталанфи по данным государственного лесного реестра. Лесоведение, 2019, №2 с.105-114.
8. Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Saushkin V.V. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021; 875: 012042. – DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012042.
9. Лисицын В.И., Новикова Т.П., Новиков А.И. Динамика роста хвойных древостоев (Pinus sylvestris L., Picea abies (L.) H. Karst и Pinus sibirica Du Tour): модифицированная модель // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 2 (54). – С. 54-69. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4.
10. Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г., Нильсон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы. – 2-е изд., доп. – Москва : Федеральное агентство лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, 2008. – 886 с. – URL: https://www.elibrary.ru/fqdwdk.
11. Лисицын В.И. Расчет эксергии хвойных (Pinus sylvestris L., Picea abies (L.) H. Karst., Pinus sibirica Du Tour) и лиственных (Quercus robur L., Betula pendula Roth) древостоев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3 (55). – С. 23-36. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2.
12. Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Электронная база данных. 4-е дополненное издание.

Монография. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-5-8295-0862-3. – URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452.

13. Erb K.-H., Gingrich S. Biomass – critical limits to a vital resource. One Earth. 2022; 5 (1): 7-9. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.014.
14. Lisitsyn V.I., Novikova T.P., Novikov A.I. Modeling the biological maturity age of pine and oak forest stands. Izv. Saint-Peterburg Forest. Tech. Akad. 2023; 246: 6-23. – DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21..
15. Сальникова И.С. и др. Таксация леса. Ход роста насаждений : учебное пособие. – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – 130 с.

References

1. Lisitsyn V.I., Drapalyuk M.V., Matveev N.N. Modelirovanie dinamiki hoda rosta drevostoev na osnove termodinamicheskogo podhoda. [Modeling the dynamics of forest stand growth based on the thermodynamic approach]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Russian Forestry Journal. 2022; 3 (387): 213-225. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225.
2. Kazimirović M., Stajić B., Petrović N., Ljubičić J., Košanin O., Hanewinkel M., Sperlich D. Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (Quercus robur L.) stands: explicit mapping of site index classification in Serbia. Annals of Forest Science. 2024; 81: 15. DOI: https://doi.org/10.1186/s13595-024-01231-0.
3. Kuehne C., McLean J.P., Maleki K., Antón-Fernández C., Astrup R. A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned even-aged Scots pine forests in Norway. Silva Fennica. 2022; 56 (1): 10627. DOI: https://doi.org/10.14214/sf.10627.
4. Maleki K., Astrup R., Kuehne C., McLean J.P., Antón-Fernández C. Stand-level growth models for long-term projections of the main species groups in Norway. Scandinavian Journal of Forest Research. 2022: 37(2): 130–143. DOI: https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2056632.
5. Lebedev A.V. Dinamicheskaya model' rosta i proizvoditel'nosti sosnovyh drevostoev (Pinus sylvestris L.) Unzhenskoj nizmennosti. [Dynamic model of growth and productivity of pine stands (Pinus sylvestris L.) of the Unzha Lowland]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2024; 14, 3 (55): 127-151. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8.
6. Li C., Barclay H., Huang S., Roitberg B., Lalonde R., Xu W., Chen Y. Modelling the stand dynamics after a thinning induced partial mortality: A compensatory growth perspective. Front. Plant Sci. 2022; 13: 1044637. DOI: 10.3389/fpls.2022.1044637.
7. Korzukhin M.D. Construction of growth curves of forest stands based on the generalized von Bertalanffy model using state forest register data. Lesovedenie, 2019, no. 2, pp. 105-114.
8. Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Saushkin V.V. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021; 875: 012042. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012042.
9. Lisitsyn V.I., Novikova T.P., Novikov A.I. Dinamika rosta hvojnyh drevostoev (Pinus sylvestris L., Picea abies (L.) H. Karst i Pinus sibirica Du Tour): modificirovannaya model. [Dynamics of coniferous forest stands growth (Pinus sylvestris L., Picea abies (L.) H. Karst and Pinus sibirica Du Tour): a modified model]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2024; 14, 2 (54): 54-69. (In Russ.). OI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4.
10. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'son S., Buluj Yu.I. Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazuyushchih porod Severnoj Evrazii : normativno-spravochnye materialy. [Tables and models of the growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia: normative and reference materials.]. 2nd ed., suppl. Moscow: Federal Forestry Agency of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 2008: 886. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/fqdwdk.
11. Lisitsyn V.I. Raschet eksergii hvojnyh (Pinus sylvestris L., Picea abies (L.) H. Karst., Pinus sibirica Du Tour) i listvennyh (Quercus robur L., Betula pendula Roth) drevostoev. [Calculation of exergy of coniferous (Pinus sylvestris L., Picea abies (L.) H. Karst., Pinus sibirica Du Tour) and deciduous (Quercus robur L., Betula pendula Roth) stands]. Lesotekhnicheskij zhurnal

= Forestry Engineering Journal. 2024; 14, 3 (55): 23-36. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2.
12. Usol'cev V.A. Biomassa i pervichnaya produkciya lesov Evrazii. [Biomass and Primary Production of Eurasian Forests]. Electronic Database. 4th Supplemented Edition. Monograph. Ekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forest Engineering University, 2023. (In Russ.). 1 electronic optical disk (CD-ROM). ISBN 978-5-8295-0862-3. URL: https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452.
13. Erb K.-H., Gingrich S. Biomass – critical limits to a vital resource. One Earth. 2022; 5 (1): 7-9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.014.
14. Lisitsyn V.I., Novikova T.P., Novikov A.I. Modeling the biological maturity age of pine and oak forest stands. Izv. Saint-Peterburg Forest. Tech. Akad. 2023; 246: 6-23. DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21.
15. Salnikova I.S. et al. Taksaciya lesa. Hod rosta nasazhdenij. [Forest taxation. Growth progress of plantations]. Teaching aid. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forest Engineering University. Yekaterinburg: USFEU, 2020: 130. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Лисицын Виктор Иванович* – кандидат ф.-м. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2148-1988, e-mail: viktor-lisicyn@yandex.ru.

Матвеев Николай Николаевич – доктор ф.-м. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9195-9580, e-mail: nmtv@vglta.vrn.ru.

Евсикова Наталья Юрьевна – кандидат ф.-м. наук, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5288-0140, e-mail: natalyaevsikova@mail.ru.

Камалова Нина Сергеевна – кандидат ф.-м. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8293-8593, e-mail: rcamel@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Victor I. Lisitsyn* – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Professor of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2148-1988, e-mail: viktor-lisicyn@yandex.ru.

Nikolay N. Matveev – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, https://orcid.org/0000-0001-9195-9580, e-mail: nmtv@vglta.vrn.ru.

Natalia Yu. Evsikova – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5288-0140, e-mail: natalyaevsikova@mail.ru.

Nina S. Kamalova – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, https://orcid.org/0000-0001-8293-8593, e-mail: rcamel@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/10
УДК 630*181.5:630*232.311.62(470.6)

Особенности роста и культивирования насаждений *QUERCUS ROBUR* L. на песках северо-восточного Предкавказья

Александр С. Манаенков[1], manaenkov1@yandex.ru, ORSID 0000-0002-20842147
Сергей Ю. Андреев[2], achikylak356890@mail
Максим А. Ульянов[3], ulyanov-m@vfanc.ru

[1,3]*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, info@vfanc.ru*

[2]*Северо-Кавказский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», с. Ачикулак, 356890, Российская Федерация, achikylak356890@mail*

Рациональное использование и предупреждение дефляционного опустынивания песчаных земель аридной зоны невозможно без их обустройства защитными лесными насаждениями. На пастбищах региона высоким защитным эффектом и долговечностью обладают древостои дуба черешчатого. Цель исследования – изучить особенности роста и водного питания дуба на разных геоморфологических типах песков, усовершенствовать режимы их облесения и приемы выращивания дубрав в регионе. Объектами исследования служили 68-85-летние насаждения на Терском и Бажиганском песчаных массивах, произрастающие при норме атмосферных осадков около 320 мм/год, испаряемости 800-1000 мм/год. Состояние и рост древостоев изучали на временных пробных площадях с использованием общепринятых методов с последующей математической обработкой полученных данных.

Установлено, что влияние атмосферных осадков на водное питание дубрав имеет относительно невысокое и крайне нестабильное влияние. Лишь в 6-9 % лет оно обеспечивается их количеством. В остальные годы рост и жизнеспособность древостоев определяется доступностью грунтовой воды, пополнение которой происходит подтоком со стороны соседних не облесенных участков. Лучшие для роста дуба условия складываются на супесчаной почве понижений с залеганием пресной или слабо минерализованной грунтовой воды на глубине 2-4 м. На перевеянных многочленных песках лесорастительные условия ухудшаются по мере уменьшения мощности предварительно увлажненного атмосферными осадками слоя почвогрунта и при минерализации грунтовой воды свыше 8-9 г/л, а также повсеместно с возрастом насаждений, в связи с израсходованием стартового запаса почвенно-грунтовой влаги. Пастбищная дигрессия травостоя на прилегающих выпасах замедляет этот процесс, способствует повышению долговечности древостоев.

На всех типах песков актуальны мелкоконтурное размещение насаждений, их чередование с открытыми участками функционирующих пастбищ, влагонакопительная обработка почвы, создание чистых культур, своевременные агротехнические уходы и изреживания древостоя.

Ключевые слова: *аридная зона, песчаные земли, лесорастительные условия, создание и выращивание насаждений*

Финансирование. Работа выполнена ФНЦ агроэкологии РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 125021302093-8 «Теоретическое обоснование инновационных технологий создания многоцелевых защитных лесных насаждений в земледельческих районах, на опустыненных пастбищах и низкопродуктивных землях засушливой зоны России» (шифр FNFE-2025-0002)».

Благодарности. автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Манаенков А.С., Андреев С. Ю., Ульянов М.А. Особенности роста и культивирования насаждений *QUERCUS ROBUR* L. на песках северо-восточного Предкавказья // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 162-179. – *Библиогр.: с. 176-178 (21 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/10.

***Поступила** 19.09.2025. **Пересмотрена** 25.10.2025. **Принята** 30.11.2025. **Опубликована онлайн** 26.12.2025.*

Article

Peculiarities of growth and cultivation of plantations of *QUERCUS ROBUR* L. on the sands of the north-eastern Pre-caucasian region

Alexander S. Manaenkov[1], manaenkov1@yandex.ru, ORSID 0000-0002-20842147

Sergey Yu. Andreev[2], achikylak356890@mail.ru

Maxim A. Ulianov[3], ulyanov-m@vfanc.ru

[1,3]Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", Volgograd, 400062, Russian Federation, info@vfanc.ru

[2]North Caucasus Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Forestry of the Russian Academy of Sciences", v. Achikulak, 356890, Russian Federation, achikylak356890@mail

Abstract

Rational use and prevention of deflationary desertification of the sandy lands of the arid zone is impossible without their provision with protective forest plantations. On the pastures of the region, the stands of oak have a high protective effect and durability. The purpose of the study is to study the peculiarities of oak growth and water supply on different geomorphological types of sands, to improve their afforestation regimes and methods of growing oak forests in the region. The objects of the study were 68-85-year-old plantations on the Tersk and Bazhigansky sand massifs, growing at a precipitation rate of about 320 mm/year, with an evaporation rate of 800-1000 mm/year. The condition and growth of stands were studied in temporary test areas using generally accepted methods followed by mathematical processing of the data obtained.

It has been established that the influence of atmospheric precipitation on the water supply of oak forests has a relatively low and extremely unstable effect. Only in 6-9% of the years it is provided by their number. In other years, the growth and viability of stands is determined by the availability of groundwater, which is replenished by the influx from neighboring non-forested areas. The best conditions for oak growth are formed on sandy loam soil of depressions with the occurrence of fresh or slightly mineralized groundwater at a depth of 2-4 m. On re-sown multi-layered sands, forest conditions worsen as the thickness of the soil layer previously moistened by precipitation decreases and with groundwater mineralization exceeding 8-9 g/l, as well as everywhere with the age of plantings, due to the depletion of the initial reserve

of soil and soil moisture. Pasture digression of the herbage in adjacent pastures slows down this process and helps to increase the longevity of the stands.

On all types of sands, fine-contoured plantings, their alternation with open areas of functioning pastures, moisture-accumulating tillage, the creation of clean crops, timely agrotechnical care and thinning of the stand are relevant.

Keywords: *arid zone, sandy lands, forest conditions, creation and cultivation of plantations*

Financing. The work was performed by the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 125021302093-8 "Theoretical substantiation of innovative technologies for creating multipurpose protective forest plantations in agricultural areas, on desolate pastures and low-yielding lands of the arid zone of Russia" (code FNFE-2025-0002).

Thanks. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Manaenkov A.S., Andreev S.Yu., Ulianov M.A. (2025) Peculiarities of growth and cultivation of plantations of *QUERCUS ROBUR* L. on the sands of the north-eastern Pre-Caucasian region. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 4 (60), pp. 162-179 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/10.

Received 19.09.2025. ***Revised*** 25.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Песчаные земли Северо-Восточного Предкавказья (Терско-Кумского междуречья) с давних времен является ценным пастбищным массивом. Интенсивный выпас скота на его территории уже в XIII-XIV вв. привел к вспышке, распространению и пролонгации до настоящего времени антропогенной дефляции почвенного покрова, сформировавшегося на отложениях древней климатогенной дефляции (А.А. Трушковский, 1961). За прошедшее время возникли сложные комплексы барханных, слабо заросших и заросших бугристых песков с участками (останцами) в разной степени дефлированных зональных супесчаных почв, преобладанию разреженной псаммофильной растительности. Существенно снизилась продуктивность и устойчивость песчано-степных экосистем, периодически возникают новые очаги подвижных песков.

Исследования в области аридных экосистем и агролесоводства демонстрируют устойчивый интерес к проблемам опустынивания и адаптивного землепользования. Работы Манаенкова и др. (2023) [1] и Манаенкова и Рыбашлыковой (2020) [5] сосредоточены на решении практических задач мелиорации деградированных земель Прикаспийского региона. Эффективность кулисных посадок кустарников для мелиорации аридных пастбищ юга России убедительно показана в исследовании Тютюмы и др. (2020) [8].

Современные зарубежные исследования отражают тенденцию к технологизации мониторинга агролесоводческих систем. Так, Dogliotti и др. (2025) [2] применяют методы дронного лазерного сканирования для оценки параметров деревьев в сильвопастбищных системах. В то же время Le и др. (2025) [3] проводят систематический анализ традиционных европейских агролесоводческих систем, выявляя перспективы их сохранения.

Значительное внимание уделяется микроклиматическим аспектам агролесоводства. Исследование Llanos и др. (2025) [4] демонстрирует улучшение термального комфорта для скота в эвкалиптовых насаждениях, тогда как Sánchez-Romero и др. (2025) [7] анализируют влияние интенсивности выпаса на растительность и почвы тропических лесов.

Актуальной проблеме адаптации к климатическим изменениям посвящена работа Safeer и др. (2025) [6], где исследуются связи между

климатической изменчивостью и внедрением агролесоводства в Пакистане. Комплексный подход, сочетающий экологические и социальные аспекты, становится характерной чертой современных исследований в данной области.

По многочисленным наблюдениям, на полиминеральных песках региона лучшими породами являются робиния (*Robinia pseudoacacia* L.), вяз мелколистный (*Ulmus parvifolia* JACQ.), осокорь (*Populus nigra* L.) и многие крупные лиственные кустарники, а также сосна крымская (*Pinus pallasiana* LAMB.) (Н.А. Смирнов, А.И. Полякова, 1963; А.С. Манаенков, Г.А Сурхаев, И.Г., Сурхаев, 2010).

Благоприятные условия для этих пород на Терских полиминеральных одночленных песках (НВ - ВЗ = 3-4,5%) складываются при залегании пресной или слабоминерализованной воды на глубине 2-5 м. На Бажиганских пылевато-мелкозернистых многочленных песках – после барханной стадии сбоя растительности при уровне грунтовой воды 6-7 м (Манаенков, Г.А Сурхаев, И.Г., Сурхаев, 2010; Н.Ф. Кулик, 1963, 1979). На заросших песках в первый год жизни культур лучшее увлажнение ризосферы обеспечивает зяблевая вспашка (П.Г. Язан, 1955; Н.А. Смирнов, 1963). Преимущество в росте и сохранности имеют чистые древостои (П.Г. Язан, 1955; Н.А. Смирнов, 1963).

На супесчаных почвах и холмисто-мелкобугристых песках, подстилаемых многочленными отложениями (НВ - ВЗ = 4-6%) при глубине залегания (уровне) грунтовой воды (УГВ) до 8 м минерализацией (МГВ) до 6-8 г/л относительно медленно растут, но имеют большую устойчивость и долговечность, чем другие породы, насаждения дуба черешчатого [П.Г. Язан, 1955; Н.Ф. Кулик, 1979; В.И. Петров и др., 2000). По исследованиям Н.Ф. Кулика их водное питание, как и насаждений других лиственных пород в засушливых условиях, в апреле – июне осуществляется за счет просочившейся (до 70-200 см) атмосферной влаги, а в июле, августе и сентябре ее запасы в слое 0-400 см снижаются до ВЗ и ниже. Водопитание из этого слоя осуществляется только после сильных дождей. Недостаток почвенной влаги древостой восполняет за счет грунтовой воды (ГВ). Ее «…потребление (243 мм) превышает количество использованных атмосферных осадков (94 мм) более чем в два раза» (Н.Ф. Кулик, 1979, с. 211). Во влажные годы потребление ГВ сокращается, в засушливые – увеличивается. «Отсутствие сквозного промачивания почвогрунтовой толщи в большинстве насаждений на Терско-Кумских песках свидетельствует о том, что подземные воды пополняют свои запасы за счет смежных участков» (Н.Ф. Кулик, 1963, с. 36). То есть за счет бокового притока из-под не облесенных песков.

Дуб экономнее расходует влагу. Его транспирационный коэффициент меньше, чем у тополя и робинии. В расчете на массу сухих листьев он составляет 1240, против 1900 и 1522 соответственно (Н.Ф. Кулик, 1963), [9]. Однако с возрастом в насаждениях дуба, как и других пород, при питании минерализованной влагой происходит повышение солесодержания (денсация солей) в капиллярной кайме и ГВ, что постепенно ухудшает условия произрастания. При хлоридно-сульфатном и сульфатно-хлоридном засолении их предельные значения для дуба составляют соответственно 0,5-0,6% и 15-18 г/л (В.И. Петров, 1989; В.И. Петров и др., 2000).

Исследования Н.Ф. Кулика посвящены исключительно изучению водного баланса в насаждениях дуба. Они проводились в середине 50-х годов на примере культур 1924-1926 гг., созданных на мелкобугристых пылевато-мелкозернистых песках Бажиганского массива при залегании сильно минерализованной (8,9 г/л) ГВ глубже 7 м. Эти насаждения начали рано распадаться и окончательно погибли в конце 60-х годов.

В настоящее время в регионе имеется около 70 га жизнеспособных искусственны дубрав, созданных позднее и достигших возраста 69-85 лет. Однако их сохранность и производительность, а также почво-пастбищезащитная эффективность уже в возрасте 25-30 лет существенно отличалась в зависимости от условий произрастания [П.Г. Язан, 1955]. Появилась возможность изучить влияние физических свойств песчаных отложений и ГВ на состояние старовозрастных древостоев дуба [10-13].

Для решения таких задач успешно используют ретроспективный анализ ростовых процессов модельных деревьев [14-21].

Цель исследования – изучить особенности роста и водного питания дуба на разных геоморфологических типах песков, усовершенствовать режимы их облесения и приемы выращивания дубрав в регионе.

Объекты, материалы и методы исследования

Объектами исследования служили 68-85-летние насаждения дуба семенного (ПП 1, 2, 4-6 и 10), смешанного (ПП 7 и 9) и порослевого (ПП 3) происхождения, произрастающие на Бажиганском (ПП 1-3, 5-10) и Терском (ПП 4) песчаных массивах в разных почвенно-грунтовых условиях (табл. 1). Норма атмосферных осадков в регионе составляет 320-360 мм/год при испаряемости 800-1000 мм/год (Атлас СССР, 1983).

Состояние и рост древостоев исследовали на временных пробных площадях методом сплошного перечета и отбора средних деревьев (Н.П. Анучин, 1982; А.Р. Родин, М.Д. Мерзленко, 1984). Пробные площади прямоугольной формы закладывали в наиболее характерных участках насаждений с расчетом получить их объективные показатели для всех выделов хозяйственной секции. Подробно описывали строение древостоя, характеристики подлеска и подроста, живого и мертвого напочвенного покрова, другие особенностей насаждений. Изучение почвенных условий проводили методом бурового зондирования на всю толщину зоны аэрации с отбором образцов почвы и грунта (включая материнскую породу) для лабораторных анализов. Определяли глубину залегания верхнего горизонта ГВ и ее минерализацию.

Толщину радиального прироста древесины: годичного кольца (ГК), ранней древесины (РД) и поздней древесины (ПД) измеряли на срезах и с помощью компьютерного сканирования кернов, взятых из 3-5 модельных деревьев на высоте 1,3 м с последующей математической обработкой полученных данных. Тесноту его связи определяли методами регрессионного анализа с суммой осадков (по данным ближайшей метеостанции с. Ачикулак) за различные периоды гидрологического года, средневзвешенным содержанием физической глины в верхнем 2-метровом слое почвогрунта (СФГ), УГВ и МГВ. Ход рост в высоту модельных деревьев изучали на срезах, взятых через 1 м, с определением тесноты связи высоты с возрастом дерева и почвенно-грунтовыми факторами.

Таблица 1 / *Table 1*

Экологические условия и таксационные показатели насаждений дуба черешчатого на Терско-Кумских песках /

Ecological conditions and taxation indicators of oak plantations on the Tersko-Kumsky sands

№ ПП — РР	Происхождение | Origin	Возраст, лет | Age, years	Рельеф | Relief	СФГ, % | PCC, %	УГВ, м | GV, m	МГВ, г/л | MG, g/l	Гус- тота, шт./га | Density, pi/he	Hcp., м | Hav., m	Dcp., см | Dav., sm	V, м^3/га | V, m^3/he	Бони-тет | Bonitet	Пол-нота, ед. | Completeness. pi	Состоя-ние насажде-ния | The state of the plantation
Бажиганский песчаный массив | Bazhigansky sand massif													
1	Семен. | seed	85	Полого-бугристый | hollow bumpy	6,8	5,7	5,4	350	11,2	27	104	V	0,5	Хорошее | Good

2	Семен. | seed	85	Мелко-бугристый | Finely bumpy	5,1	7,9	8,7	290	11,0	36	126	V	0,4	Хорошее | Good
3	Порос. | coppicing	68	Полого-волнистый | Hollow-wavy	10,5	4,0	5,2	420	11,3	30	182	V	0,6	Хорошее | Good
5	Семен. | seed	76	Полого-бугристый | hollow bumpy	9,1	4,7	8,5	150	8,0	30	45	Va	0,3	Хорошее | Good
6	Семен. | seed	83	Мелко-бугристый | Finely bumpy	8,6	4,9	8,7	190	12,0	35	114	V	0,5	Хорошее | Good
7	Смеш. | mixed	76	Полого-бугристый | hollow bumpy	10,2	5,2	8,5	200	10,0	30	87	Va	0,6	Хорошее | Good
8	Порос. | coppicing	83	Понижение | Downgrading	6,2	7,5	7,5	170	11,0	34	102	V	0,4	Хорошее | Good
9	Смеш. | mixed	71	Понижение | Downgrading	10,8	3,7	6,9	18	12,0	27	78	IV	0,6	Хорошее | Good
10	Семен. | seed	83	Мелко-бугристый | Finely bumpy	14,4	7,3	4,3	160	16,0	32	100	IV	0,5	Хорошее | Good
Терский песчаный массив | Tersk sand massif													
4	Семен. | seed	70	Понижение | Downgrading	9,1	2,9	10,6	390	17,0	32	265	III	0,7	Хорошее | Good

Примечание. № ПП, Hср., Dср. и V – Номер пробной площади, средняя высота и средний диаметр насаждения, запас стволовой древесины живых деревьев (сухостой отсутствует).

Note. PP, Nsr., Dsr. and V are the number of the test area, the average height and average diameter of the plantation, and the stock of live tree trunks (there is no deadwood).

.

Корреляционный и регрессионный анализ данных полевых наблюдений проводили на ЭВМ с использованием типовой программы STATGRAPHICS 5.0; оценку уровня связи роста древостоев с изучаемыми факторами – по (Б.А. Доспехов, 1979).

Результаты исследования и их обсуждение

Погодные условия периода роста дуба мало отличались от средних многолетних показателей. За последние 71 год среднегодовая сумма осадков составила 323 мм с колебаниями от 123 мм (в 1985/1986 г/г.) до 697 мм (в 2003/2004 г/г). За холодный период (ноябрь–март) выпадало от 39 мм (в 1983/1984 г/г) до 409 мм (в 2003/2004 г/г), в среднем 99 мм (31%). За теплый период – от 72 мм (1974/1975 г/г) до 489 мм (в 2008/2009 г/г), в среднем 224 мм. Коэффициент вариации сумм осадков составил соответственно 53, 32 и 37%. Из них 30 лет на 10% и более были влажнее средних, 34 года засушливее, а 7 лет близкие к ним. При этом влажные периоды состояли из 2-5 лет и чередовались с засушливыми периодами из 3-4 лет. Наиболее нестабильными были осадки холодного периода, обеспечивающие весенний запас почвенной влаги и прирост РД.

При норме водопотребления насаждений дуба на разных по плодородию почвогрунтах 300-350 мм/год атмосферные осадки могли обеспечивать её только в 6-9%-х лет.

Средняя температура воздуха фиксировалась несколько выше многолетней нормы в оба сезона последних семи десятилетий.

На Бажиганских пылевато-мелкозернистых песках 70-85-летние насаждения дуба (см. табл. 1) в большинстве представлены относительно редким (150-200 деревьев / га), с неравномерно сомкнутым лесным пологом, низкорослым (8-12 м) чистыми древостоем IV-Va бонитета из толстомерных (20-50 см) деревьев, имеющих здоровый вид и жизнеспособное состояние (сильно ослабленных и усыхающих деревьев 1-3%). Деревья дуба растут как в понижениях, так и на песчаных буграх, сопутствующие породы практически выпали. Подлесок отсутствует. В понижения древостой дуба гуще и тоньше. Встречается его 1-2-летний самосев. При невысокой производительности и товарности, он надежно стабилизирует рельеф и создает благоприятную экологическую обстановку. Проекция крон редко стоящих деревьев составляет 50-100 м^2, в куртинах – несколько меньше. В знойные дни летнего периода в 14:30 – 15:00 тень под их пологом покрывает 80-90 % площади насаждения, надежно защищая поверхность почвы и животных от перегрева.

На многочленных влагоемких песках наиболее высокие насаждения (до 15-16 м) приурочены к участкам с относительно большой мощностью зоны аэрации и низкой минерализацией ГВ (ПП 10). В обширном понижении на супесчаной почве Терского массива при УГВ около 3 м полнотное насаждение дуба (ПП 4) с подлеском из скумпии, вяза и груши высотой 1-3 м и редким подростом произрастает в окружении древостоев робинии, гледичии и вяза. Благонадежный подрост дуба высотой до 2-3 м встречается и на значительном расстоянии от этого насаждения. К 70 годам оно достигло высоты 17-18 м. Однако МГВ за последние десять засушливых лет увеличилась с 3-4 г/л до 10-11 г/л, что может привести к его быстрому расстройству.

На всех исследованных участках пылевато-мелкозернистых песков кривые хода роста в высоту дуба имеют схожий характер (рис.1). Семенные древостои растут медленно – средний прирост в высоту составляет 11-14 см в год, редко больше. Немногим быстрее растут порослевые и смешанные по происхождению насаждения (ПП 3 и 7).

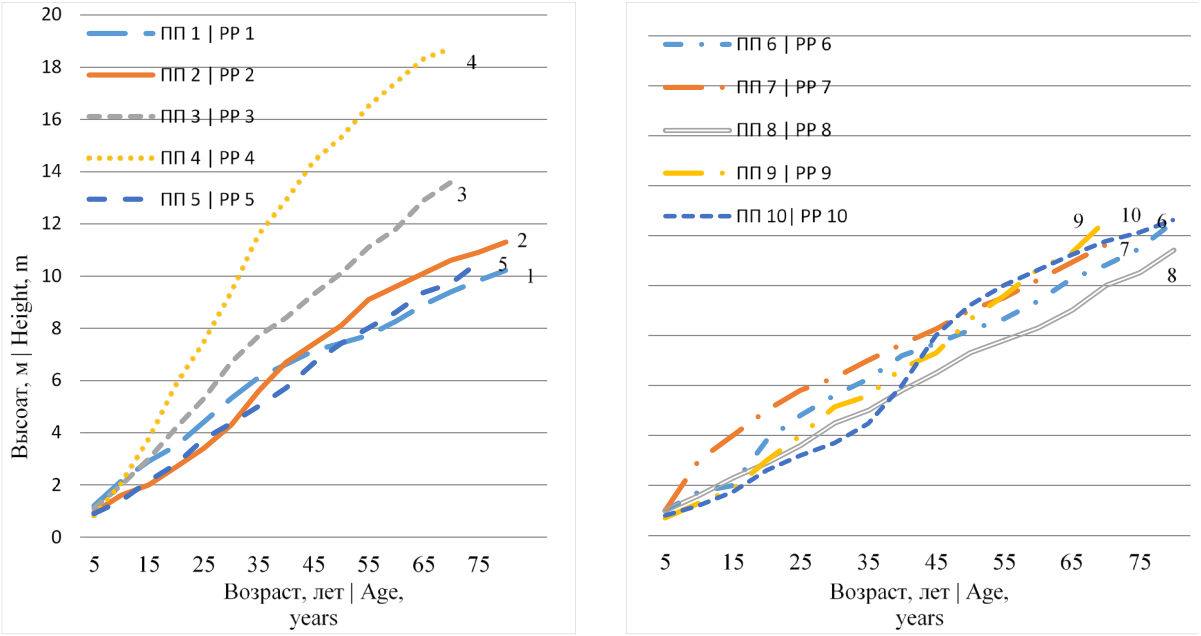


Рис.1. Ход роста в высоту дуба черешчатого в насаждениях на Терско-Кумских песках.

Fig.1. Growth rate in height of petiole oak in plantations on the Tersko-Kumsky sands.

Источник: собственные графики автора

Source: the author's own charts

Утяжеление гранулометрического состава верхней 2-метровой толщи в диапазоне связный песок – средняя супесь (табл. 2) несколько угнетает этот рост до 40-45 лет, а после 70 – стимулирует его (r = 0,59 – 0,63). В первый период роста, это может быть вызвано снижением увлажняющей эффективности весенне-летних осадков. В последующие годы обусловлено, по-видимому, разреживанием лесного полога, значительным сокращением текущего прироста, формированием его преимущественно за счет весеннего запаса почвенной влаги. Понижение УГВ с 4 до 8 м отрицательно сказывается на росте дуба в высоту после 5 лет, а повышение МГВ с 4 до 8-9 г/л его не угнетает, что обусловлено питанием молодого древостоя в основном влагой атмосферных осадков текущего и предшествующего периодов.

Таблица 2 / *Table 2*

Зависимость (r) высоты древостоя дуба черешчатого от почвенно-грунтовых условий на Терско-Кумских песках /

Dependence (r) of stand height of oak cherry stands on soil and ground conditions in the Tersko-Kumsky sands

Возраст древостоя, лет | The age of the stand, age	СФГ, % | PCC, %	УГВ, м | GV, m	МГВ, г/л | MG, g/l	СФГ+ УГВ | PCC + GV	СФГ+ МГВ | PCC + MG	УГВ+ МГВ | GV + MG	СФГ+ УГВ+ МГВ | PCC + GV + MG
5	-0,36	0,16	-0,19	-0,38	-0,63	-0,22	-0,66
10	-0,16	-0,25	0,26	-0,32	0,26	-0,32	-0,33
15	-0,13	-0,45	0,34	-0,50	0,35	-0,50	-0,51
20	-0,08	-0,65	0,48	-0,68	0,54	-0,72	-0,72
25	-0,10	-0,72	0,50	-0,76	0,56	-0,79	-0,79
30	-0,16	-0,74	0,48	-0,80	-0,79	-0,79	-0,80
35	-0,21	-0,67	0,51	-0,75	0,52	-0,75	-0,76
40	-0,15	-0,64	0,50	-0,69	0,54	-0,72	-0,72
45	-0,03	-0,58	0,42	-0,59	0,50	-0,63	-0,64
50	0,04	-0,58	0,39	-0,58	0,52	-0,62	0,64
55	0,04	-0,57	0,38	-0,57	0,51	-0,61	0,63
60	0,06	-0,60	0,38	-0,57	0,51	-0,61	0,63
65	0,07	-0,62	0,37	-0,62	0,53	-0,65	-0,67
70	0,08	-0,63	0,35	-0,64	0,51	-0,66	-0,67
75	0,63	-0,13	-0,24	0,72	0,7	0,3	0,89
80	0,59	-0,03	0,06	0,59	0,97	0,06	0,98

Примечание. r – коэффициент корреляции.
Note. r is the correlation coefficient.
Источник: собственные вычисления автора
Source: the author's own calculations

Наиболее заметное снижение прироста в высоту в среднем возрасте древостоя происходит с обогащением верхнего слоя глиной при одновременном понижении УГВ, т.е. при снижении увлажняющей эффективности летних осадков и доступности грунтовой влаги на фоне отсутствия

буферного запаса почвенной влаги (накопленного до создания и в ювенильный период роста культур).

Радиальный прирост дуба (толщина годичного кольца, табл. 3) увеличивается до третьего (ПП 2, 4, 6-10) – четвертого (ПП 1, 3, 5 и 7) десятилетия (в среднем с 1,4-2,6 мм – в первое десятилетие, до 2,1-4,6 мм – в 3-4-е), а затем постепенно уменьшается до 1,0-1,3 мм в последние годы. За весь период жизни древостоя его средняя величина составляет 1,8-3,3 мм, но чаще – 2,0-2,5 мм, а коэффициент вариации по пробным площадям – 28-43 (до 76) %. Наибольший прирост и его ранняя кульминация отмечены в насаждении при близком залегании УГВ (ПП 4). Последнее, по-видимому, является следствием повышенной динамичности её уровня и минерализации.

В структуре радиального прироста большую долю занимает поздняя древесина. В среднем она составляет 51-89%, а коэффициент ее вариации – 37-80%. Это подтверждает мнение о доминирующем значении в водном питании насаждений дуба на песках засушливой зоны ГВ и влаги осадков второй половины вегетации, а также свидетельствует о повышенной пространственной пестроте лесорастительных условий.

Таблица 3 / *Table 3*

Радиальный прирост (мм) и его коэффициент вариации (С, %) в насаждениях дуба на Терско-Кумских песках (фрагмент) /

Radial growth (mm) and its coefficient of variation (C, %) in oak stands on the Tersko-Kumsky sands (fragment)

Прирост | Growth	№ ПП | № РР							
	1		2		3		4	
	Прирост | Growth	*C*	Прирост | Growth	*C*	Прирост | Growth	*C*	Прирост | Growth	*C*
До 10 лет | Up to 10 years old								
ГК | AR	1,92±0,09	16,2	1,37±0,12	29,0	3,55±0,24	21,4	4,43±0,38	27,6
РД | EW	0,83±0,06	24,1	0,67±0,05	26,3	1,20±0,08	21,5	0,79±0,05	21,0
ПД | LW	1,09±0,10	29,4	0,73±0,08	38,2	2,25±0,17	24,0	3,34±0,37	35,3
11-20 лет | 11-20 years old								
ГК | AR	1,94±0,13	21,6	2,07±0,22	34,9	2,40±0,17	23,6	7,80±0,93	37,7
РД | EW	0,77±0,07	30,0	0,77±0,08	35,7	0,92±0,05	19,0	0,81±0,06	24,3
ПД | LW	1,12±0,09	28,1	1,30±0,17	43,6	1,48±0,15	32,1	7,39±0,66	28,4
21-30 лет | 21-30 years old								
ГК | AR	1,93±0,19	32,4	2,90±0,31	34,2	2,67±0,37	43,9	3,80±0,47	39,3
РД | EW	0,78±0,07	30,0	0,94±0,09	32,1	1,05±0,13	41,6	0,63±0,06	33,5
ПД | LW	1,15±0,15	42,0	1,96±0,25	40,4	1,62±0,24	48,2	3,12±0,39	39,9
31-40 лет | 31-40 years old								
ГК | AR	2,11±0,10	15,8	2,77±0,31	36,0	4,60±0,61	42,1	2,56±0,17	21,8
РД | EW	0,97±0,02	6,9	1,04±0,06	19,3	1,60±0,17	35,4	0,42±0,03	24,5
ПД | LW	1,14±0,09	27,4	1,76±0,24	44,0	3,00±0,44	47,1	2,62±0,41	49,4
41-50 лет | 41-50 years old								
ГК | AR	1,93±0,17	27,8	2,45±0,34	44,5	3,80±0,24	20,7	1,50±0,02	5,4
РД | EW	0,91±0,06	21,0	0,87±0,12	45,6	1,40±0,14	32,8	0,25±0,01	21,0
ПД | LW	1,02±0,12	38,8	1,58±0,24	49,3	2,40±0,14	19,1	1,26±0,03	7,6
51-60 лет. | 51-60 years old								
ГК | AR	1,52±0,15	32,7	3,16±0,31	31,8	2,38±0,18	25,1	1,43±0,01	3,3
РД | EW	0,74±0,07	31,9	1,17±0,07	20,5	1,08±0,08	23,8	0,23±0,01	21,0
ПД | LW	0,78±0,08	34,0	1,99±0,26	42,5	1,40±0,17	40,5	1,22±0,01	3,4
61-70 лет | 61-70 years old								
ГК | AR	1,67±0,12	24,1	2,49±0,29	37,9	2,00±0,21	32,6	1,42±0,01	3,2
РД | EW	0,80±0,06	27,6	0,83±0,06	23,4	0,86±0,07	26,4	0,18±0,01	18,8
ПД | LW	0,87±0,06	23,0	1,56±0,24	50,3	1,08±0,15	42,9	1,22±0,01	3,7

71-80 лет | 71-80 years old								
ГК | AR	1,44±0,15	34,6	1,78±0,11	20,6	-	-	-	-
РД | EW	0,66±0,06	30,4	0,58±0,02	13,6	-	-	-	-
ПД | LW	0,78±0,10	43,9	1,25±0,10	25,9	-	-	-	-
За весь период жизни | For the entire period of life								
ГК | AR	1,78±0,05	28,2	2,34±0,11	42,9	3,07±0,15	43,0	3,33±0,30	76,3
РД | EW	0,80±0,02	27,2	0,85±0,03	35,3	1,16±0,05	36,8	0,48±0,03	58,3
ПД | LW	0,90±0,03	36,7	1,49±0,08	51,2	1,90±0,11	49,9	2,93±0,28	79,5

Примечание. До 10 лет, 11-20 лет … – возраст древостоя.
Note.; up to 10 years, 11-20 years ... – the age of the stand.
Источник: собственные вычисления автора
Source: the author's own calculations

Математический анализ среднего радиального прироста древесины для всей совокупности насаждений (табл. 4) показал, что в возрасте до 10 лет он имеет слабую положительную связь с осадками холодного периода ($r = 0,10$). Более тесно ($r = 0,30$) он связан с осадками за апрель-июнь, и в средней степени с их суммой за июль-сентябрь, весь теплый период и г/г (соответственно r = 0,35, 0,34 и 0,35). При этом прирост ранней древесины практически индифферентен к сумме осадков и ритмике их выпадения в г/г, а поздней – имеет значительную зависимость (r = 0,39-0,47) от их параметров в вегетационный период. Т.е. развитие молодняков дуба на песках в основном определяется стартовым запасом почвенной влаги, сформировавшимся до создания культур и в ювенальный период их жизни, а также обеспеченностью осадками весенне-летнего и летне-раннеосеннего периодов. В последующие годы, вплоть до высокого возраста, значение осадков холодного периода для его формирования остается низким, а значение осадков теплого периода и всего г/г носит неустойчивый характер (r = 0,00-0,37). Это, по-видимому, обусловлено в целом невысокой почвоувлажняющей эффективностью атмосферных осадков в сформировавшихся насаждениях дуба и разной для них доступностью ГВ в зависимости от почвенных условий.

Таблица 4 / *Table 4*

Зависимость (*r*) радиального прироста дуба черешчатого от суммы атмосферных осадков в насаждениях на Терско-Кумских песках /

The dependence (r) of the radial growth of the black oak on the amount of precipitation in the plantations on the Tersko-Kuma sands

Возраст древос-тоя, лет | The age of the stand, age	Средний прирост, мм | Average growth, mm	Сумма атмосферных осадков (мм)						
		ХП | CP	ТП | WP	г/г | H/Y	IV-VI	VII-IX	X	ХП+X
1-10	ГК | AR	0,10	0,34	0,35	0,30	0,35	-0,13	0,08
	РД | EW	-0,26	-0,06	-0,16	-0,09	-0,04	0,08	-0,23
	ПД | LW	0,15	0,45	0,47	0,39	0,45	-0,14	0,14
11-20	ГК | AR	0,05	0,16	0,16	0,16	0,09	0,02	0,01
	РД | EW	0,04	0,19	0,18	0,12	0,20	-0,05	-0,08
	ПД | LW	0,02	0,15	0,14	0,18	0,05	0,01	-0,01
21-30	ГК | AR	0,06	0,07	0,08	0,09	0,01	-0,03	0,05
	РД | EW	0,04	0,02	0,03	-0,04	0,09	-0,04	0,03
	ПД | LW	0,03	0,09	0,09	0,11	0,01	-0,05	0,02

31-40	ГК | AR	-0,03	0,10	0,08	0,13	0,04	-0,15	-0,07
	РД | EW	0,19	0,06	0,13	0,08	0,03	-0,11	0,17
	ПД | LW	-0,11	0,05	0,00	0,10	-0,02	-0,14	-0,15
41-50	ГК | AR	0,00	0,11	0,09	0,08	0,12	-0,04	0,01
	РД | EW	0,03	0,07	0,07	0,08	0,08	-0,09	0,01
	ПД | LW	-0,04	0,12	0,09	0,07	0,13	0,01	-0,01
51-60	ГК | AR	-0,03	-0,01	-0,02	-0,05	0,01	0,03	-0,03
	РД | EW	-0,07	0,00	-0,03	0,02	0,00	-0,02	-0,08
	ПД | LW	0,04	-0,01	0,01	-0,08	0,03	0,05	0,04
61-70	ГК | AR	-0,05	0,10	0,05	0,10	0,04	0,05	-0,01
	РД | EW	0,02	0,16	0,12	0,12	0,11	0,08	0,06
	ПД | LW	-0,13	-0,01	-0,06	0,04	-0,03	-0,05	-0,11
71-80	ГК | AR	0,25	0,33	0,37	0,22	0,23	0,08	0,28
	РД | EW	0,21	0,22	0,27	0,22	0,09	0,06	0,17
	ПД | LW	0,22	0,30	0,34	0,16	0,25	0,07	0,29

Примечание. ХП, ТП, г/г, IV-VI, VII-IX и X – за холодный, теплый периоды, гидрологический год, апрель-июнь, июль-сентябрь и октябрь гидрологического года.

Note. ХП, ТП, г/г, IV-VI, VII-IX and X are for cold, warm periods, hydrological year, April-June, July-September and October of the hydrological year.

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's own calculations

В этом обеспеченном теплом регионе с большой продолжительности вегетационного периода атмосферные осадки октября не оказывают влияния на рост дуба в толщину. Их величина лишь несущественно повышает его зависимость от осадков холодного периода в следующем г/г (до 70-летнего возраста r не превышает 0,01-0,17), свидетельствуя о большом расходе влаги октябрьских дождей на физическое испарение. Однако коэффициент вариации суммы осадков холодного периода текущего года, вместе с осадками за октябрь предыдущего г/г, снижается на 11% (с 53 до 42%), что не исключает возможность их позитивного влияния на влагозарядку почвы – выравнивание весеннего запаса влаги по годам.

Анализ связи радиального прироста древесины с осадками раздельно по пробным площадям свидетельствует о ее большой изменчивости. Тем не менее, в сформировавшихся (30-50 лет) и старшего возраста древостоях на относительно тяжелых почвогрунтах (ПП 1, 5, 7, 8, 9, 10, физической глины в 2-м слое 6-14 %) и при глубоком залегании (5-7 м) минерализованной (7-10 г/л) ГВ она более тесная (r=0,30-0,77), особенно с осадками холодного периода и июля – сентября. На участках с более легкими отложениями или близким залеганием менее засоленной грунтовой влаги эта связь ослабевает. А при УГВ 3-4 м связь прироста с суммой атмосферных осадков становится отрицательной (ПП 3, 4), и, по-видимому, объясняется высоким подъемом ее уровня во влажные годы, подтоплением и кислородным голоданием корневой системы дуба.

Данные математического анализа связи радиального прироста древесины с почвенно-грунтовыми условиями (табл. 5) не противоречит сделанным выводам.

Так, на среднюю (за весь период жизни древостоев) толщину годичного кольца и поздней древесины положительно сказывается утяжеление состава верхнего 2-метового слоя – повышение его влагоемкости. Особенно сильно (r=0,30-0,77) этот эффект проявляется в насаждениях до 20-летнего возраста, и обусловлен формированием относительно большого стартового запаса почвенной влаги, ее повышенной биологической эффективностью в период, когда ГВ еще не доступна, или мало доступна для корней. В среднем

возрасте, после исчерпания буферного запаса почвенной влаги и снижения эффективности осадков гидрологического года, значение глинистости песков снижается до незначительной величины и становится противоречивой, а после 50-ти лет снова повышается.

Понижение уровня ГВ и повышение ее концентрации, напротив, сопровождаются сокращением средней толщины годичного кольца и поздней древесины, особенно в период наиболее активного роста древостоев. С возрастом насаждений их значение может становиться как положительным, так и отрицательным, что, очевидно, обусловлено большой мозаикой и неоднозначностью влияния различных сочетаний почвенно-грунтовых факторов на водное питание дуба.

Оценка совместного влияния различных почвенно-грунтовых факторов (см. табл. 5), вследствие их наложения, а также воздействия лесокультурных, биоценотических и других особенностей, не дает однозначного ответ на вопрос о динамике лесопригодности земель.

Таблица 5 / *Table 5*

Зависимость (*r*) радиального прироста дуба черешчатого в пастбищезащитных насаждениях на Терско-Кумских песках от почвенно-грунтовых условий/

The dependence (r) of the radial growth of scalloped oak in pasture-protective plantations on the Tersko-Kuma sands on soil and soil conditions

Возраст древостоя, лет | The age of the stand, age	Ширина прироста, мм | Increment width, mm	Экологические факторы					
		СФГ, % | PCC, %	УГВ, м | GV, m	МГВ, г/л | MG, g/l	СФГ+ УГВ | PCC + GV	СФГ+ МГВ | PCC + MG	УГВ+ МГВ | GV + MG
До 10 лет | Up to 10 years old	ГК | AR	0,34	-0,07	-0,72	-0,74	0,38	-0,73
	РД | EW	0,12	-0,17	-0,48	-0,55	0,17	-0,48
	ПД | LW	0,32	-0,02	-0,65	-0,66	0,39	-0,66
В 11-20 лет | At the age of 11-20	ГК | AR	0,72	-0,32	-0,55	-0,69	0,73	0,80
	РД | EW	0,39	-0,28	-0,09	-0,32	0,40	0,40
	ПД | LW	0,65	-0,27	-0,52	-0,64	0,67	0,74
В 21-30 лет | At the age of 21-30	ГК | AR	-0,12	0,51	0,02	0,52	0,56	-0,12
	РД | EW	-0,28	0,39	0,08	0,42	0,40	-0,28
	ПД | LW	-0,09	0,43	0,04	0,44	0,48	-0,09
В 31-40 лет | At the age of 31-40	ГК | AR	-0,10	0,01	-0,39	-0,39	-0,11	-0,45
	РД | EW	-0,27	0,00	-0,11	-0,11	-0,34	-0,33
	ПД | LW	0,15	-0,04	-0,53	-0,54	0,16	-0,53
В 41-50 лет | At the age of 41-50	ГК | AR	-0,27	0,10	-0,26	-0,27	-0,29	-0,45
	РД | EW	-0,29	0,10	-0,16	-0,17	-0,31	-0,39
	ПД | LW	-0,19	0,09	-0,32	-0,32	-0,19	-0,44
В 51-60 лет | At the age of 51-60	ГК | AR	0,08	-0,31	0,57	0,61	-0,34	0,63
	РД | EW	-0,23	-0,09	0,51	0,51	-0,37	0,52
	ПД | LW	0,29	-0,40	0,43	0,54	-0,40	0,61
В 61-70 лет | At the age of 61-70	ГК | AR	0,11	-0,46	0,51	0,63	-0,50	0,57
	РД | EW	-0,23	-0,15	0,48	0,23	-0,18	0,24
	ПД | LW	0,39	-0,56	0,33	-0,19	0,12	0,19
В 71-80 лет | At the age of 71-80	ГК | AR	0,46	-0,90	0,24	-0,91	-0,91	0,61
	РД | EW	0,36	-0,77	-0,25	-0,76	-0,61	0,15
	ПД | LW	0,42	-0,80	0,40	-0,55	-0,46	0,24
За весь период жизни | For the entire period of life	ГК | AR	0,43	-0,18	-0,62	-0,68	0,45	-0,68
	РД | EW	-0,17	-0,02	-0,06	-0,07	-0,23	-0,20
	ПД | LW	0,47	-0,14	-0,52	-0,57	0,50	-0,62

Примечание. Обозначения те же, что и в таблицах 1 и 3.

Note. The designations are the same as in Tables 1 and 3.

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's own calculations

Тем не менее, полученные данные позволяют утверждать, что в первом десятилетии жизни с понижением УГВ с 3-4 до 7-8 м прирост дуба в толщину сокращается как в первой, так и во второй половине периода вегетации (r = -0,48 и -0,66). Во втором – по-видимому, благодаря достижению корнями капиллярной каймы ГВ, он ускоряется. В 3-5-ом десятилетиях рост древостоя замедляет повышение МГВ. Позднее положительный отзыв радиального прироста на понижение УГВ высокой концентрации можно объяснить изреживанием насаждений, снижением их потребности в грунтовой влаге и позитивной динамикой атмосферного увлажнения в нулевые годы текущего столетия.

В целом проведенное исследование подтверждает вывод Н.Ф. Кулика о решающей роли грунтовой влаги в питании сформировавшихся насаждений дуба на песках Восточного Предкавказья, но оно имеет существенную возрастную, эдафическую динамику и может корректироваться в процессе их выращивания.

Выводы

Таким образом, на песках Терско-Кумского междуречья влияние атмосферных осадков на увлажнение ризосферы и водное питание древостоев носит крайне неустойчивый характер. С возрастом насаждений и ростом их потребности в почвенной влаге оно снижается. При норме расхода сомкнутых дубрав на транспирацию в размере 300-350 мм/год оно может удовлетворяться за счет осадков лишь в 6-9 % лет. В остальные годы их влагообеспеченность, рост и состояние определяет доступность грунтовой воды (капиллярно-подпертой влаги), пополнение которой происходи путем подтока со стороны соседних слабо заросших или открытых песков.

Негативной особенностью климата региона является низкая увлажняющая эффективность летне-осенних дождей, небольшая величина и крайне высокая изменчивость суммы осадков холодного периода. Поэтому, на влагообеспеченность, рост и состояние лесонасаждений большое влияние оказывают рельеф, почвенно-грунтовые, агротехнические, лесокультурные и биоценотические факторы, от которых зависит стартовый запас, биологическая эффективность доступной влаги, интенсивность ее потребления и пополнения.

Лесорастительные условия облесенных площадей ухудшаются с возрастом древостоев в связи с израсходованием многолетнего (стартового) запаса почвенной влаги, снижением уровня и повышением минерализации грунтовой воды. Пастбищная дигрессия травостоя на прилегающих выпасах замедляет эти процессы, способствует повышению долговечности насаждений.

С небольшим допущением можно утверждать, что лучшие для роста дуба условия складываются на супесчаной почве понижений с неглубоким (2-4 м) залеганием пресной или слабо минерализованной грунтовой воды.

На бугристых пылевато-мелкозернистых многочленных песках Бажиганского массива при высокой пестроте лесорастительных условий лесообразовательный потенциал земель имеет сравнительно небольшие различия. В молодом возрасте культуры дуба энергично растут как при относительно неглубоком залегании ГВ (в понижениях рельефа), так и при значительной мощности зоны аэрации с наличием большого стартового запаса почвенной влаги. Относительно тяжелый состав верхнего (0-50 см) слоя снижает эффективность осадков теплого периода, ухудшает их водное питание. Условия роста сформировавшихся дубрав на этих песках постепенно ухудшаются с повышением минерализации ГВ. Прогрессирующее угнетение прироста древостоя наступает при её значениях выше 8-9 г/л.

Облесение песчаных земель региона культурами дуба нуждается в дифференцированном подходе.

При освоении участков с супесчаными почвами на одночленных или многочленных низковлагоемких песках при неглубоком залегании пресной или слабо засоленной грунтовой воды, наиболее важными являются мероприятия, направленные на снижение интенсивности ее потребления. Они должны включать зяблевую или однолетнюю паровую обработку почвы, посадку (посев) умеренно густых чистых культур дуба,

агротехнические уходы до смыкания крон в междурядьях, своевременное интенсивное изреживание молодняков.

При облесении мощных многочленных песков важно иметь большой стартовый запас почвенной влаги и обеспечивать его экономное расходование. Для этого в первую очередь целесообразно осваивать земли, продолжительное время пребывающие в слабо заросшем состоянии. На сильно задернелых песках следует применять влагонакопительную основную обработку почвы. Создавать необходимо чистые культуры с относительно широкими междурядьями и увеличенным шагом посадки (посева), своевременно проводить агротехнические уходы. Рубки прочистки и прореживания должны обеспечивать равномерно-редкое размещение деревьев при неплотно сомкнутом состоянии крон.

На всех типах песков актуально мелкоконтурное размещение культур и чередование их с открытыми участками функционирующих пастбищ.

Список литературы

1. Манаенков А.С., Рыбашлыкова Л.П., Сивцева С.Н., Маховикова Т.Ф. Лесопастбищное освоение опустыненных земель Прикаспия // Arid Ecosystems. – 2023. – Т. 29, № 1(94). – С. 15–24. – DOI: https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-15-24.
2. Dogliotti, G., Rizzo, I., Baietto, A., et al. (2025). Evaluating the effect of tree position on crown area, height, and crown asymmetry in Silvopastoral systems using drone laser scanning (DLS)-based segmentation. Agroforestry Systems, 99, Article 240. https://doi.org/10.1007/s10457-025-01340-3
3. Le, T.H., Bonari, G., Sauerwein, M., et al. (2025). Traditional agroforestry systems in Europe revisited: a systematic review. Agroforestry Systems, 99, Article 236. https://doi.org/10.1007/s10457-025-01335-0
4. Llanos, P.N., Gonzalez, C.M., Fedrigo, J.K., et al. (2025). Early-stage Eucalyptus-based silvopastures improve thermal comfort conditions for cattle grazing native grasslands during summer. Agroforestry Systems, 99, Article 255. https://doi.org/10.1007/s10457-025-01347-w
5. Manaenkov, A.S., & Rybashlykova, L.P. (2020). Increasing the efficiency of plant-cover restoration in the modern focus of deflation on pastures of the northwestern Caspian region. Arid Ecosystems, 10(4), 358–367. https://doi.org/10.1134/S2079096120040149
6. Safeer, M., Zubair, M., Hussain, T., et al. (2025). Climatic variability linkages with agroforestry adoption in Pakistan: a socio-ecological review. Agroforestry Systems, 99, Article 263. https://doi.org/10.1007/s10457-025-01359-6
7. Sánchez-Romero, R., Balvanera, P., García-Barrios, L.E., et al. (2025). Impacts of silvopastoral management intensity and forest age on vegetation and soils of dry tropical forests. Agroforestry Systems, 99, Article 220. https://doi.org/10.1007/s10457-025-01334-1
8. Tyutyuma, N.V., Bulakhtina, G.K., Kudryashov, A.V., & Kudryashova, N.I. (2020). Meliorative efficiency of shrub coulisses in arid pastures of southern Russia. Arid Ecosystems, 10(1), 52–57. https://doi.org/10.1134/S2079096120010126
9. Uhl, E., Biber, P., Ulbricht, M., et al. (2015). Analysing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using Nelder trials along an environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results. Forest Ecosystems, 2, Article 17. https://doi.org/10.1186/s40663-015-0041-8
10. Zhang, H., Zhou, Y., Ji, X., Wang, Z., & Liu, Z. (2025). Climate change drives the adaptive distribution and habitat fragmentation of Betula albosinensis forests in China. Forests, 16(1), Article 184. https://doi.org/10.3390/f16010184
11. Lim, W., Park, H.-C., Park, S., Seo, J.-W., Kim, J., & Ko, D.W. (2025). Modeling Tree Mortality Induced by Climate Change-Driven Drought: A Case Study of Korean Fir in the Subalpine Forests of Jirisan National Park, South Korea. Forests, 16(1), Article 84. https://doi.org/10.3390/f16010084
12. Yang, R., Wang, F., Tang, X., Cui, J., Wang, G., Guo, L., & Zhang, H. (2025). Quantification of Soil Water Dynamics Response to Rainfall in Forested Hillslope Based on Soil Water Potential Measurement. Forests, 16(1), Article 75. https://doi.org/10.3390/f16010075
13. Zhang, W., Chen, W., Xu, M., Di, K., Feng, M., Wu, L., Wang, M., Yang, W., Xie, H., Chen, J., et al. (2025). Differences

in the Sensitivity of Gross Primary Productivity and Ecosystem Respiration to Precipitation. Forests, 16(1), Article 153. https://doi.org/10.3390/f16010153

14. Каплина Н.Ф. Составляющие динамики прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого в нагорной дубраве южной лесостепи // Известия вузов. Лесной журнал. – 2020. – № 5(337). – С. 51–63.
15. Кузьмин С.Р. Реакция ширины годичного кольца и доли поздней древесины у сосны обыкновенной на погодные условия в географических культурах // Известия вузов. Лесной журнал. – 2020. – № 5. – С. 64–80.
16. Housset, J.M., Tóth, E.G., Girardin, M.P., Tremblay, F., Motta, R., Bergeron, Y., & Carcaillet, C. (2021). Tree-rings, genetics and the environment: Complex interactions at the rear edge of species distribution range. Dendrochronologia, 69, Article 125863. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125863
17. Kazimirović, M., Stajić, B., Petrović, N., et al. (2024). Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (Quercus robur L.) stands: explicit mapping of site index classification in Serbia. Annals of Forest Science, 81, Article 15. https://doi.org/10.1186/s13595-024-01231-0
18. Laskurain, N.A., Aldezabal, A., Odriozola, I., Camarero, J.J., & Olano, J.M. (2018). Variation in the Climate Sensitivity Dependent on Neighbourhood Composition in a Secondary Mixed Forest. Forests, 9(1), Article 43. https://doi.org/10.3390/f9010043
19. Maillet, J., Nehemy, M.F., Mood, B., Pappas, C., Bonsal, B., & Laroque, C. (2022). A Multi-Scale Dendroclimatological Analysis of Four Common Species in the Southern Canadian Boreal Forest. Dendrochronologia, 72, Article 125936. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125936
20. Savero, A.M., Kim, J.-H., Purusatama, B.D., Prasetia, D., Wahyudi, I., Iswanto, A.H., Lee, S.-H., & Kim, N.-H. (2024). Radial Variation of Wood Anatomical Characteristics and Maturation Ages of Six Korean Oak Species. Forests, 15(3), Article 433. https://doi.org/10.3390/f15030433
21. Tree Ring: Online International Tree-Ring Data Bank. NOAA, National Centers for Environmental Information. Retrieved from https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring

References

1. Manaenkov A.S., Rybashlykova L.P., Sivtseva S.N., Makhovikova T.F. Lesopastbishchnoe osvoenie opustynennykh zemel' Prikaspiya. [Silvopastoral development of desertified lands of the Caspian region]. Arid Ecosystems. 2023;29(1(94)):15-24. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-15-24.
2. Dogliotti G., Rizzo I., Baietto A. et al. Evaluating the effect of tree position on crown area, height, and crown asymmetry in Silvopastoral systems using drone laser scanning (DLS)-based segmentation. Agroforestry Systems. 2025;99:240. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-025-01340-3.
3. Le T.H., Bonari G., Sauerwein M. et al. Traditional agroforestry systems in Europe revisited: a systematic review. Agroforestry Systems. 2025;99:236. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-025-01335-0.
4. Llanos P.N., Gonzalez C.M., Fedrigo J.K. et al. Early-stage Eucalyptus-based silvopastures improve thermal comfort conditions for cattle grazing native grasslands during summer. Agroforestry Systems. 2025;99:255. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-025-01347-w.
5. Manaenkov A.S., Rybashlykova L.P. Increasing the efficiency of plant-cover restoration in the modern focus of deflation on pastures of the northwestern Caspian region. Arid Ecosystems. 2020;10(4):358-367. DOI: https://doi.org/10.1134/S2079096120040149.
6. Safeer M., Zubair M., Hussain T. et al. Climatic variability linkages with agroforestry adoption in Pakistan: a socio-ecological review. Agroforestry Systems. 2025;99:263. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-025-01359-6.
7. Sánchez-Romero R., Balvanera P., García-Barrios L.E. et al. Impacts of silvopastoral management intensity and forest age on vegetation and soils of dry tropical forests. Agroforestry Systems. 2025;99:220. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-025-01334-1.
8. Tyutyuma N.V., Bulakhtina G.K., Kudryashov A.V., Kudryashova N.I. Meliorativnaya effektivnost' kulis iz kustarnikov na aridnykh pastbishchakh yuga Rossii. [Meliorative efficiency of shrub coulisses on arid pastures of the south of Russia]. Arid Ecosystems. 2020;10(1):52-57. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.1134/S2079096120010126.

9. Uhl E., Biber P., Ulbricht M. et al. Analysing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using Nelder trials along an environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results. Forest Ecosystems. 2015;2:17. DOI: https://doi.org/10.1186/s40663-015-0041-8.
10. Zhang H., Zhou Y., Ji X., Wang Z., Liu Z. Climate change drives the adaptive distribution and habitat fragmentation of Betula albosinensis forests in China. Forests. 2025;16(1):184. DOI: https://doi.org/10.3390/f16010184.
11. Lim W., Park H.-C., Park S., Seo J.-W., Kim J., Ko D.W. Modeling Tree Mortality Induced by Climate Change-Driven Drought: A Case Study of Korean Fir in the Subalpine Forests of Jirisan National Park, South Korea. Forests. 2025;16(1):84. DOI: https://doi.org/10.3390/f16010084.
12. Yang R., Wang F., Tang X., Cui J., Wang G., Guo L., Zhang H. Quantification of Soil Water Dynamics Response to Rainfall in Forested Hillslope Based on Soil Water Potential Measurement. Forests. 2025;16(1):75. DOI: https://doi.org/10.3390/f16010075.
13. Zhang W., Chen W., Xu M., Di K., Feng M., Wu L., Wang M., Yang W., Xie H., Chen J. et al. Differences in the Sensitivity of Gross Primary Productivity and Ecosystem Respiration to Precipitation. Forests. 2025;16(1):153. DOI: https://doi.org/10.3390/f16010153.
14. Kaplina N.F. Sostavlyayushchiye dinamiki prirosta ranney i pozdney drevesiny stvola duba chereshchatogo v nagornoy dubrave yuzhnoy lesostepi. [Components of the dynamics of early and late wood increment of the pedunculate oak stem in the upland oak forest of the southern forest-steppe]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2020;(5(337)):51-63. (In Russ.).
15. Kuz'min S.R. Reaktsiya shiriny godichnogo kol'tsa i doli pozdney drevesiny u sosny obyknovennoy na pogodnyye usloviya v geograficheskikh kul'turakh. [Response of the width of the annual ring and the proportion of latewood in Scots pine to weather conditions in geographical cultures]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2020;(5):64-80. (In Russ.).
16. Housset J.M., Tóth E.G., Girardin M.P., Tremblay F., Motta R., Bergeron Y., Carcaillet C. Tree-rings, genetics and the environment: Complex interactions at the rear edge of species distribution range. Dendrochronologia. 2021;69:125863. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125863.
17. Kazimirović M., Stajić B., Petrović N. et al. Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (Quercus robur L.) stands: explicit mapping of site index classification in Serbia. Annals of Forest Science. 2024;81:15. DOI: https://doi.org/10.1186/s13595-024-01231-0.
18. Laskurain N.A., Aldezabal A., Odriozola I., Camarero J.J., Olano J.M. Variation in the Climate Sensitivity Dependent on Neighbourhood Composition in a Secondary Mixed Forest. Forests. 2018;9(1):43. DOI: https://doi.org/10.3390/f9010043.
19. Maillet J., Nehemy M.F., Mood B., Pappas C., Bonsal B., Laroque C. A Multi-Scale Dendroclimatological Analysis of Four Common Species in the Southern Canadian Boreal Forest. Dendrochronologia. 2022;72:125936. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125936.
20. Savero A.M., Kim J.-H., Purusatama B.D., Prasetia D., Wahyudi I., Iswanto A.H., Lee S.-H., Kim N.-H. Radial Variation of Wood Anatomical Characteristics and Maturation Ages of Six Korean Oak Species. Forests. 2024;15(3):433. DOI: https://doi.org/10.3390/f15030433.
21. Tree Ring: Online International Tree-Ring Data Bank. NOAA, National Centers for Environmental Information. URL: https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring

Сведения об авторах

Манаенков Александр Сергеевич – д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр., заведующий лабораторией Защитного лесоразведения и фитомелиорации низкопродуктивных земель. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», manaenkov-a@vfanc.ru.

Андреев Сергей Юрьевич – директор Северо-Кавказского филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук».

Ульянов Максим Андреевич – лаборант-исследователь лаборатории Защитного лесоразведения и фитомелиорации низкопродуктивных земель. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», ulyanov-m@vfanc.ru.

Information about the authors

Alexander S. Manaenkov – Doctor of Agricultural Sciences, Chief Scientist. Associate Professor, Head of the Laboratory of Protective Afforestation and Phytomelioration of low-yielding lands. Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", manaenkov-a@vfanc.ru.

Sergey Yu. Andreev – is the director North Caucasus Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences".

Maxim A. Ulyanov – is a laboratory researcher at the Laboratory of Protective Afforestation and phytomelioration of low–yielding lands. Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", ulyanov-m@vfanc.ru.

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/11
УДК 630*614.841.2+632.7.04/08

Временные закономерности горимости лесов, нарушенных энтомовредителями, на территории подтаёжной зоны Средней Сибири

Александра И. Мельник[1]✉**,** aleksandruna2013@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1673-1639
Андрей А. Вайс[1]**,** vais6365@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4965-3670
Павел В. Михайлов[1]**,** mihaylov.p.v@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3967-0709
Владислав В. Селиванов[1]**,** selivan23.04@mail.ru

[1]*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Российская Федерация*

Обеспечение сохранности и устойчивого функционирования лесных насаждений имеет ключевое значение в противодействии усугубляющимся климатическим изменениям. Поддерживая экологический баланс, лесные экосистемы обеспечивают стабильность природных процессов. Помимо промышленной эксплуатации лесов, основными факторами сокращения лесопокрытых площадей являются лесные пожары, массовые вспышки насекомых, и распространение болезней. К наиболее вредоносным видам, поражающим темнохвойные насаждения на территории подтаёжной зоны Средней Сибири, относятся сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) и полиграф уссурийский (*Polygraphus proximus* Blandford). Актуальным направлением является поиск взаимосвязей между повреждениями энтомовредителей и горимостью лесов, что позволит улучшить прогнозирование пожарной опасности в лесных насаждениях и в формировании обоснованных мер противопожарной защиты. В исследовании использовались данные о лесных пожарах за 2000–2023 гг. с применением общеизвестной методики вычисления показателя горимости, а также сведения о погоде (согласно корреляционному анализу выявлена слабая взаимосвязь – коэффициент равен 0,23). Анализ по повреждениям лесных насаждений проведен по данным Федерального агентства лесного хозяйства России «Рослесхоз». На основе анализа количественных показателей выявлено, что в насаждениях, пострадавших от сибирского шелкопряда (*D. sibiricus* Т.), вероятность возникновения пожаров существенно возрастает через 2 года после повреждения, а в пихтовых насаждениях, пострадавших от полиграфа уссурийского (*P. proximus* В.), – преимущественно на 8-й год. Предполагается тенденция к увеличению частоты и горимости в повреждённых насаждениях при современном уровне лесной охраны. Для снижения негативных последствий необходим комплекс профилактических и хозяйственных мероприятий, разрабатываемых лесным хозяйством. Полученные результаты способствуют улучшению понимания влияния энтомовредителей на лесную пожароопасность и могут быть применены в управлении лесными ресурсами подтаёжной зоны Средней Сибири.

Ключевые слова: *лесной пожар, энтомовредитель, горимость лесов, инвазия, темнохвойные леса, сибирский шелкопряд, Dendrolimus sibiricus Tschetv., полиграф уссурийский, Polygraphus proximus Blandford, пожарная опасность*

Финансирование: Исследование проводилось в рамках государственного задания, установленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, для реализации проекта «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» (№ FEFE–2024–0029) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Временные закономерности горимости лесов, нарушенных энтомовредителями, на территории подтаёжной зоны Средней Сибири / А. И. Мельник, А. А. Вайс, П. В. Михайлов, В. В. Селиванов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 180-201. – *Библиогр.: с. 196-200* (32 назв.). – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/11.

Поступила 13.10.2025. ***Пересмотрена*** 15.11.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Temporal patterns of wildfire occurrence in forests disturbed by pests in the subtaiga zone of Central Siberia

Alexandra I. Melnik[1], aleksandruna2013@gmail.com, 0000-0002-1673-1639
Andrey A. Vais[1], vais6365@mail.ru, 0000-0003-4965-3670
Pavel V. Mikhailov[1], mihaylov.p.v@mail.ru, 0000-0003-3967-0709
Vladislav V. Selivanov[1], selivan23.04@mail.ru

[1]*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation*

Abstract

Ensuring the conservation and sustainable functioning of forest ecosystems is key to achieving climate mitigation. By maintaining ecological balance, forests stabilize natural processes. In addition to forest exploitation, wildfires, pest and disease outbreaks are the main factors in reforestation. The most harmful species affecting dark coniferous forests in the subtaiga zone of Central Siberia include the Siberian moth (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) and the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford). The search for relationships between damage caused by pests and forest flammability is a current trend. This will improve fire danger forecasting and the development of effective fire protection measures. The study examined forest fire data from 2000 to 2023, employing a recognized method to calculate the flammability index and incorporating weather data. The analysis of forest stand damage was carried out using data from the Federal Agency for Forestry (Rosleskhoz). Analysis of quantitative indicators revealed that the probability of fires increases significantly two years after damage to forests disturbed by the Siberian moth (*D. sibiricus* T.), and mainly in the eighth year for fir forests damaged by the four-eyed fir bark beetle (*P. proximus* B.). Given the current level of forest protection, an increase in the frequency of fires in pest-disturbed forests is expected. In order to mitigate the negative consequences, a variety of preventive measures and forest management strategies are required. The results obtained improve our understanding of the impact of pests on forest fire hazard, and can be applied to forestry in the subtaiga zone of Central Siberia.

Keywords: forest fire, pest, forest flammability, invasion, dark coniferous forests, Siberian moth, *Dendrolimus sibiricus* Tschetv., four-eyed fir bark beetle, *Polygraphus proximus* Blandford, fire hazard

Funding: The research was carried out within the project «Dynamics of restoration of Central Siberian taiga forests disturbed by insect pests» (№ FEFE-2024-0029) within the framework of the state assignment, set out by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, for the implementation by the Scientific Laboratory of Forest Ecosystems.

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.
Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Melnik A.I., Vais A.A., Mikhailov P.V., Selivanov V.V. (2025). Temporal patterns of wildfire occurence in forests disturbed by pests in the subtaiga zone of Central Siberia. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 180-201 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/11.

Received 13.10.2025. ***Revised*** 15.11.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

В настоящее время важной задачей лесного хозяйства является сохранение лесных насаждений. С 2019 года в нашей стране осуществляется федеральный проект «Сохранение лесов», который в 2024 продлен на период 2025–2030 гг. Проект предусматривает ряд задач, направленных на естественное и искусственное лесовосстановление, на своевременную заготовку спелой и перестойной древесины, на оснащение специализированной лесопожарной техникой и оборудованием для проведения комплекса мероприятий по охране лесов от пожаров.

Российские ученые внесли значительный вклад в изучение последствий изменения климата для бореальных лесов. Одной из основополагающих работ является исследование Швиденко А.З. и Щепщенко Д.Г. (2013) [1], в котором была дана комплексная оценка пожарной ситуации в лесах России. Авторы установили, что в период с 1998 по 2010 гг. в стране ежегодно выгорало в среднем 8,2 млн га растительности, причем на леса приходилось около половины этой площади. Это приводило к значительным выбросам углерода – в среднем (1,21 ± 0,28) * 10^8 т С в год. Важным выводом работы стал прогноз, основанный на данных моделей общей циркуляции, о возможности «драматического усиления пожарных режимов» к концу XXI века, что может привести к масштабной потере лесного покрова. В качестве меры противодействия авторы предложили стратегию перехода к адаптивному лесному хозяйству [1].

Более позднее исследование Липки О.Н. и др. (2021) [2], развивает идею адаптивного управления, концентрируясь на роли лесов в адаптации природных систем в целом. Коллектив авторов подчеркивает, что леса выступают не только как пассивный объект воздействия, но и как активный компонент, стабилизирующий климатические изменения, например, за счет секвестрации углерода. В работе рассматриваются механизмы повышения устойчивости лесных экосистем и анализируются различные сценарии их адаптации, что является логическим продолжением и углублением тезисов, выдвинутых ранее [2].

Исследование Прожериной Н.А. и Наквасиной Е.Н. (2022) смещает фокус с экосистемного на видовой и внутривидовой уровень. Авторы анализируют влияние изменения климата на адаптацию и изменчивость хвойных видов в европейской части Севера России. Ключевой вывод заключается в том, что реакция лесных пород будет неоднородной и зависит от географического происхождения популяции и ее генетических характеристик (фенотипическая пластичность). Авторы отмечают, что в условиях устойчивого потепления продуктивность лесов может возрасти благодаря удлинению вегетационного периода, однако в регионах с учащением засух она, напротив, может снизиться. Это требует учета внутривидовой изменчивости при планировании лесовосстановительных мероприятий [3].

Зарубежные исследования вносят важный вклад в развитие методов прогнозирования и моделирования пожарных рисков. Так, Chen et al. (2022) предложили усовершенствованную модель для прогнозирования лесных пожаров в Центральном и Северном Китае. Их инновация заключается во введении в модель фактора времени, прошедшего с момента последних осадков («time-decaying precipitation»), что позволило значительно повысить точность прогноза пожарной опасности по сравнению с традиционными методами [4].

Работа Lohmander et al. (2022) демонстрирует применение климатических сценариев для прогнозирования лесных пожаров в Центрально-Богемском регионе Чехии. Авторы не только связывают частоту и интенсивность пожаров с изменением климата, но и добавляют важный экономический и управленческий аспект – анализ зависимости ущерба от времени атаки (время, необходимое для обнаружения и тушения пожара). Это подчеркивает необходимость инвестиций в системы раннего обнаружения и быстрого реагирования [5].

Широкомасштабный подход характерен для исследования Pokharel et al. (2023), которые разработали климатически-чувствительные модели оценки пожарного риска и смертности деревьев для лесов США. Эти модели интегрированы в систему прогнозирования углеродного баланса лесов, что позволяет оценивать не только непосредственный ущерб от пожаров, но и их долгосрочное влияние на углеродный цикл в условиях меняющегося климата [6].

Проведенный анализ показывает, что современные исследования единодушно подтверждают тесную связь между изменением климата и усилением пожароопасности в лесных экосистемах. Российские работы Швиденко А.З. и Щепащенко Д.Г. (2013), Липки О.Н. и др (2021) и Прожериной Н.А. и Наквасиной Е.Н. (2022) закладывают теоретическую и эмпирическую базу для понимания проблемы в бореальных лесах, акцентируя необходимость перехода к адаптивному управлению и учету генетико-экологических особенностей древесных пород. Международные исследования Chen et al. (2022), Lohmander et al. (2022) и Pokharel et al. (2023) дополняют эту картину, развивая сложные методы прогнозирования и включая экономические и углеродные аспекты в анализ последствий. В совокупности эти работы формируют комплексное представление о вызовах, стоящих перед лесным хозяйством в XXI веке.

Продолжая анализ литературы, необходимо рассмотреть исследования, посвященные комплексному воздействию на лесные экосистемы, где пожары выступают не как изолированный фактор, а в связке с другими нарушениями, такими как вспышки насекомых-вредителей. Кроме того, отдельное внимание уделяется современным методам дистанционного мониторинга состояния лесов.

Исследование **Жилы С.В. и др. (2023)** вносит важный вклад в понимание механизма формирования пожарной опасности. Авторы напрямую связывают вспышки численности энтомовредителей, в частности уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford), с последующим увеличением пожарной опасности в пихтовых древостоях Красноярского края. Их работа показывает, что поврежденные насаждения характеризуются **значительно возросшими запасами лесных горючих материалов** (ЛГМ). Это создает кумулятивный эффект: биотическое повреждение ослабляет и частично уничтожает лес, приводя к накоплению мертвой древесины, что, в свою очередь, многократно увеличивает потенциальную интенсивность и вероятность возникновения катастрофических пожаров [8].

Эта тема получает развитие в работе **Гераськиной А.П. и др. (2021)**, где пожары рассматриваются как мощный фактор деградации, ведущий не только к прямым потерям древесной фитомассы, но и к **утрате биоразнообразия и ключевых функций лесных экосистем**. Авторы подчеркивают, что пожары, особенно повторяющиеся и высокой интенсивности, приводят к глубоким и зачастую необратимым изменениям в почвенном покрове, видовом составе и способности экосистемы к самовосстановлению и выполнению средообразующих функций [9].

Работа **Баранчикова Ю.Н. (2021)**, хотя и сфокусирована на историческом аспекте, предоставляет ценнейший контекст для понимания долгосрочной динамики взаимодействия «насекомые-пожары». На примере вспышки массового размножения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) в Красноярском крае в 1960-х годах, автор анализирует проблему на стыке науки и практики, показывая, как масштабные биотические нарушения создают предпосылки для изменения пожарного режима на обширных территориях тайги [12].

Исследование **Quan et al. (2022)** расширяет географический контекст, проводя сравнительный анализ движущих сил лесных пожаров в приграничных регионах Китая, Северной Кореи и России. Такой трансграничный подход крайне важен, так как демонстрирует, что факторы пожарной опасности (антропогенные, климатические, топографические) имеют разный вес в зависимости от социально-экономических условий и практик землепользования по разные стороны границы. Это указывает на необходимость разработки скоординированных международных стратегий управления пожарными рисками [7].

Группа работ демонстрирует прогресс в области дистанционного мониторинга для раннего выявления проблем. Исследование **Cessna et al. (2021)** представляет передовой метод картирования состояния еловых лесов, поврежденных короедом (P. proximus B.), на уровне отдельного дерева. Для этого авторы используют фьюжн спектральных и структурных данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Этот подход позволяет с высокой точностью диагностировать начальные стадии усыхания, что критически важно для своевременного принятия управленческих решений [10].

Аналогичную задачу, но для условий России и с использованием спутниковых данных, решает **Слинкина О.А. (2024)**. В ее работе исследуются возможности определения состояния темнохвойных лесов, поврежденных энтомовредителями, по спутниковым снимкам. Это направление представляется чрезвычайно перспективным для мониторинга обширных и труднодоступных лесных территорий Сибири и Дальнего Востока, позволяя оперативно оценивать масштабы и динамику повреждений [11].

Таким образом, современные исследования все чаще фокусируются на **комплексном и каскадном характере угроз** для лесных экосистем, где изменение климата, вспышки насекомых-вредителей и пожары образуют взаимосвязанный «треугольник риска». Работы [8, 9, 12] убедительно показывают, что массовое размножение насекомых является не просто сопутствующим фактором, а ключевым драйвером, коренным образом повышающим пожарную опасность. В то же время, исследования [7, 10, 11] указывают на развитие адекватных инструментов ответа на эти вызовы – от сравнительного анализа риск-факторов на трансграничных территориях до внедрения высокоточных методов дистанционного мониторинга для раннего предупреждения и оценки ущерба.

Необходимо также указать исследования, углубляющие понимание экологии насекомых-вредителей, представляющие новейшие методы дистанционной диагностики состояния лесов и предлагающие конкретные стратегии управления пожарными рисками.

Исследование Сультсон С.М. и др. (2024) предоставляет глубокий экологический анализ резерваций сибирского шелкопряда (D. sibiricus T.) в условиях Алтае-Саянского региона. Авторы вводят важное понятие «резерваций» – устойчивых очагов вредителя в оптимальных для него стациях, которые служат постоянным источником для возникновения новых вспышек. Эта работа раскрывает механизм поддержания популяции вредителя в межвспышечный период, что имеет ключевое значение для прогнозирования и организации превентивных мер, дополняя исторический контекст, описанный Баранчиковым Ю.Н. (2021) [13, 12].

Методы дистанционного мониторинга повреждений, упомянутые в работах Cessna et al. (2021) и Слинкиной О.А. (2024), получают дальнейшее развитие в исследованиях Ковалева А.В. и Суховольского В.Г. (2021) и Duarte et al. (2022). Ковалев А.В. и Суховольский В.Г. (2021) предлагают методику анализа устойчивости древостоев к нападению насекомых на основе данных дистанционного зондирования. Их подход позволяет не только фиксировать уже произошедшие повреждения, но и оценивать предрасположенность лесных массивов к атакам вредителей на основе структурных и спектральных характеристик [14].

Систематический обзор Duarte et al. (2022) обобщает последние достижения в области мониторинга лесных вредителей и болезней с использованием беспилотных летательных

аппаратов (БПЛА). Авторы делают вывод, что технологии БПЛА, особенно при комбинировании данных сверхвысокого пространственного разрешения с методами машинного обучения, совершили переворот в возможностях раннего обнаружения, идентификации и картирования очагов повреждений на уровне отдельных крон и деревьев [15]. Это напрямую соотносится с выводами Cessna et al. (2021) и указывает на становление нового технологического уклада в лесопатологическом мониторинге [10].

Работа Москальченко С.А. и др. (2014), хотя и опубликованная ранее, остается актуальной для понимания долгосрочной динамики пожарной опасности в одном из ключевых регионов Сибири. Авторы констатировали рост горимости лесов Красноярского края в начале XXI века, связывая это с увеличением засушливости климата и частоты опасных метеоявлений. Их выводы о смещении пика пожарного сезона на более ранние сроки и росте числа крупных пожаров хорошо согласуются с прогнозами, сделанными Швиденко А.З. и Щепащенко Д.Г. (2013) [16, 1].

Итоговый стратегический взгляд на проблему представлен в работе Подрезова Ю.В. (2023), который систематизирует основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций. Автор акцентирует необходимость комплексного подхода, включающего не только совершенствование тактики тушения, но и развитие систем прогнозирования и мониторинга, проведение превентивных противопожарных мероприятий (например, контрольные выжигания), а также совершенствование нормативно-правовой базы. Эта работа служит практическим ориентиром для реализации теоретических наработок, представленных в других проанализированных источниках [17].

Проведенный анализ научной литературы позволяет выявить формирование целостной парадигмы, рассматривающей климатические изменения, вспышки массового размножения насекомых-вредителей и лесные пожары как систему взаимосвязанных и взаимно усиливающих друг друга угроз для бореальных лесов.

Современные исследования единодушно подтверждают, что потепление климата выступает ключевым драйвером изменений, приводя к увеличению частоты, интенсивности и продолжительности пожароопасных сезонов, а также создавая более благоприятные условия для развития популяций насекомых-вредителей. При этом повреждения лесов насекомыми представляют собой не изолированное явление, а критически важное звено в каскаде нарушений. Массовое размножение вредителей приводит к масштабному усыханию древостоев и резкому увеличению запасов лесных горючих материалов, что многократно повышает пожарную опасность. Последующие пожары, особенно высокой интенсивности, в свою очередь, наносят удар по биоразнообразию и ключевым функциям лесных экосистем, подрывая их устойчивость и способность к восстановлению.

Ответом на эти комплексные вызовы становится технологический прорыв в области мониторинга. Значительный блок научных работ посвящен развитию методов дистанционного зондирования. Особенно перспективным направлением является использование беспилотных летательных аппаратов и технологий фьюжн данных, которые позволяют перейти от простой констатации фактов повреждений к прогностическому анализу и ранней диагностике проблем на уровне отдельных крон и деревьев.

В качестве стратегического ответа в научной литературе обосновывается настоятельная необходимость перехода от традиционной, реактивной модели лесного хозяйства к проактивной и адаптивной стратегии. Такой подход требует интеграции климатических прогнозов, данных мониторинга вредителей и современных методов оценки пожарного риска в повседневную практику управления лесами, что является залогом сохранения их стабильности и продуктивности в условиях меняющегося климата.

Проведенный анализ литературы убедительно демонстрирует, что взаимодействие между вспышками массового размножения насекомых-вредителей и лесными пожарами представляет собой серьезную угрозу для

бореальных лесов. Исследования российских ученых выявили кумулятивный эффект, при котором повреждение древостоев энтомовредителями приводит к значительному увеличению запасов лесных горючих материалов, создавая условия для возникновения катастрофических пожаров. В то же время ряд работ подтверждают рост горимости лесов Сибири на фоне климатических изменений.

Актуальность данного направления исследований обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных мер противопожарного управления лесами в условиях наблюдаемых климатических изменений и учащающихся вспышек массового размножения энтомовредителей. Особую значимость это приобретает для подтаёжной зоны Средней Сибири – ключевого региона в углеродном балансе бореальных лесов, где взаимодействие энтомогенных и пирогенных факторов изучено недостаточно полно.

В этой связи целью нашего исследования является установление зависимости между повреждением лесных массивов энтомовредителями и динамикой пожарной активности в условиях подтаёжной зоны Средней Сибири на основе анализа количественных показателей за период с 2000 по 2023 года.

Материалы и методы

Объектом изучения стали лесные массивы таёжной зоны центральной Сибири. Подзона средней тайги занимает широкую, пониженную часть Центральной Сибири между долинами Нижней Тунгуски и Вилюя на севере и водоразделом Катанги и Ангары на юге. В неё входит почти весь Енисейский кряж к северу от Ангары. Трапповые массивы покрыты влажными лиственничными лесами со сфагново-зеленомошными и кустарниково-зеленомошными сообществами на дерново-глеевых почвах. В Центрально-Тунгусской впадине встречаются ерниковые и осоково-гипновые болота. В основном доминируют лиственничные леса, однако в настоящее время широко распространены смешанные сосново-лиственничные и берёзовые массивы. На южных склонах встречаются сосновые леса, на восточных и северных – еловые. Восточная часть подзоны занята лесами из даурской лиственницы на разреженных древостоях, растущими на якутских палевых почвах [20].

Южная тайга Центральной Сибири характеризуется преобладанием сосновых и сосново-лиственничных лесов – высокобонитетных, высокопродуктивных и ценных для эксплуатации. На юго-восточных склонах выше 400 м лиственничные леса сменяются кедрово-пихтовыми и лиственнично-еловыми. Широко распространены вторичные березовые леса [18].

Практически весь лесной фонд региона пострадал от неоднократно повторяющихся пожаров: после первых возгораний территория восстанавливалась быстро, а после вторичных – происходили существенные изменения ландшафта, в частности формирование травянистых и кустарниковых сообществ. Обилие берёзовых лесов обусловлено частыми пожарами [18].

Анализ горимости лесов Центральной Сибири основан на данных о лесных пожарах за 2000–2023 гг. и сведениях о погоде из «ИСДМ-Рослесхоз» [19]. Оценка повреждений проводилась по данным Федерального агентства лесного хозяйства «Рослесхоз».

Фактические характеристики горимости – это количество и частота пожаров. Показатель горимости территорий вычислялся по методике М.А. Софронова [20].

Обработка материалов выполнялась с применением корреляционного анализа. Статистические вычисления производились в специализированном пакете «STATISTICA» и пакете анализа данных «Excel».

Выявление временных закономерностей горимости лесов, нарушенных энтомовредителями, проведено для территории Енисейского лесничества Западно-Сибирского южно-таежного равнинного лесного района и лесничеств Среднесибирского подтаежно-лесостепного района.

Результаты и обсуждение

За период 2000–2023 гг. на территории Центральной Сибири зарегистрировано 26915 пожаров («ИСДМ-Рослесхоз» [19]). Ежегодно возникало в среднем 1124 лесных пожаров, с

колебаниями их численности от 436 до 2548 шт., которые являлись значительными по площади как по годам, так и по лесничествам. За анализируемый период общая лесная площадь, пройденная пожарами, составила 4783,6 тыс. га, средняя площадь одного пожара 177 га (рисунок 1).



Рисунок 1. Динамика горимости лесов в Центральной Сибири за 2000–2023 гг.
(по оси X – годы; по оси Y1 – площадь пожаров, тыс. га; по оси Y2 – количество пожаров, шт.)
Figure 1. Dynamics of forest fire occurrence in Central Siberia from 2000 to 2023 (X-axis – year; Y1-axis – area burnt by fire, thousand hectares; Y2-axis – number of fires)
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

В динамике наблюдается увеличение численности пожаров в период с 2012 по 2023 годы. Максимальное количество пожаров выявлено в период 2000–2011 гг. В Центральной Сибири установлено 8994 пожара. В среднем ежегодно регистрировалось по 749 пожаров, а в последующие годы наблюдался всплеск количества пожаров, в среднем – 1493 шт./год. Максимумы числа пожаров в отдельные годы обусловлены устойчивыми продолжительными антициклонами с сухой и ветреной погодой в отдельные пожароопасные сезоны и пожароопасные периоды [21, 22].

При анализе распределения лесных пожаров на территории Центральной Сибири за исследуемый период в зависимости от лесного района показал, что пожары распределены неравномерно. Наибольшее количество пожаров приходится на Нижнеангарский таежный район, где за 24 года зарегистрировано 10800 шт., а максимальная площадь, пройденная пожарами, в Среднесибирском плоскогорном таежном районе 2313 тыс. га.

Основное количество пожаров наблюдалось в таежной зоне (62,4% по числу и 57,5% по площади), где произрастает основная часть сосновых лесов и находится большое количество вырубок, быстро достигающих состояния пожарной зрелости. Преобладают низовые пожары разной интенсивности.

По данным Федерального агентства лесного хозяйства России «Рослесхоз» в Центральной Сибири за период с 2009 по 2022 год максимальная относительная площадь поврежденных насаждений насекомыми-вредителями отмечалась в Западно-Сибирском средне-таежном равнинном районе (487 га на 100 тыс. га), Западно-Сибирском южно-таежном равнинном районе (849 га на 100 тыс. га) и в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе (158 га на 100 тыс. га). Минимальная относительная площадь отмечалась в следующих лесных районах: Среднесибирский плоскогорно-таежный, Нижнеангарский таежный, Алтае-Саянский горно-таежный и Алтае-Саянский горно-лесостепной.

Основным вредителем насаждений в Западно-Сибирском средне-таежном и Западно-Сибирском южно-таежном равнинном районе стала вспышка массового размножения сибирского шелкопряда (*D. sibiricus* Т.). В Среднесибирском

подтаежно-лесостепном районе в основном к повреждению и гибели лесов привел полиграф уссурийский (*P. Proximus* В.). Данные насекомые-вредители представляют наибольшую опасность для темнохвойных лесов таёжной зоны Средней Сибири [22–25], которые приводят к масштабным нарушениям и их усыханием. Территории с усохшим древостоем чрезвычайно пожароопасные и тушить их трудно в связи с большой захламленностью.

Лесной фонд Енисейского лесничества представлен в основном лиственными древостоями 53%, из хвойных – пихтой (12,1%) и кедром (11,4%). Значительная доля площади занята болотными экосистемами. Класс природной пожарной опасности низкий 3,2.

За 2015–2019 годы в лесничестве зарегистрировано более 33 тыс. очагов сибирского шелкопряда (*D. sibiricus* Т.). Ежегодно в среднем выявлялось 6670 очагов, с колебаниями от 36 до 17289 очагов в год. За исследуемый период общая площадь поврежденных и усохших насаждений составила более 481 тыс. га.

В Енисейском лесничестве до начала вспышки в период с 2007–2014 гг. количество пожаров на 100 тыс. га (шт./год): в пихтовых насаждениях – 0,1 (низкая), в кедровых – 0,3 (низкая). В период с 2017–2023 гг. количество пожаров на 100 тыс. га, (шт./год) в темнохвойных насаждениях лесничества увеличилась в 1,8 раза до 0,56 (умеренная).

Анализ распределения по годам количества зарегистрированных пожаров в шелкопрядниках с 2015 по 2023 годы показывает, что пожары стали возникать с 2017 года, на третий год после повреждения. За период с 2017–2023 годы (рисунок 2) в шелкопрядниках зарегистрировано 43 пожара, в среднем по 6 шт. в год с колебаниями от 2 до 18 пожаров.

Темнохвойные насаждения, в силу своих микроклиматических особенностей, а именно влажности, горят крайне редко. С связи со спецификой питания сибирского шелкопряда (*D. sibiricus* Т.), который является филлофагом, процесс пожарного созревания лесных территорий происходит достаточно быстро. В момент дефолиации, значительно меняются уровни влажности, воздействия солнечной радиации (а как следствие общей температуры) и скорость воздушного потока. Все эти факторы наряду с повышенной захламленностью территорий значительно и резко повышают скорость созревания лесных горючих материалов, что создает благоприятные условия для возникновения и распространения устойчивых пожаров.

Дополнительно эти процессы меняют ботанический состав травяного покрова, увеличивается доля однолетних и легко воспламеняющихся видов, которые более приспособлены к новым условиям среды. В последствии это приводит в лесных массивах к накоплению еще большего количества сухих и мертвых органических остатков к уже имеющимся.

За исследуемый период в поврежденных сибирским шелкопрядом (*D. sibiricus* Т.) насаждениях общая площадь, пройденная пожарами, составила 22517 га. Средняя площадь пожара 523,6 га, что в 8 раз превышает среднюю площадь пожара в темнохвойных насаждениях в период с 2000–2017 гг. Численность пожаров во времени имеет колебательный характер с тенденцией снижения в период с 2018 по 2020 год. Площадь пожаров за этот период 2972 га. В последующие 3 года площадь пожаров достигла 19545 га. В среднем пройденная площадь пожарами в год составляла 6,5 тыс. га. Это, по мнению авторов, связано не с ухудшением погодных условий в последующие годы, так как связь количества пожаров с погодными условиями слабая (коэффициент корреляции равен 0,23). В период 2017–2020 годы, горели шелкопрядники, которые произрастали на супесчаных и суглинистых почвах по возвышенным элементам рельефа. В последующие годы загорелись и участки, которые произрастали в более влажных условиях, так как изменился в них видовой состав лесных горючих материалов. Они стали интенсивно высыхать в результате увеличение солнечной радиации и скорости ветра в виду отсутствия древесного полога.

Оценка степени нарушенности территории участковых лесничеств сибирским шелкопрядом

(*D. sibiricus* T.) и пожарами показала, что в Енисейском лесничестве из 7 участковых лесничеств, где насаждения повреждены шелкопрядом (*D. sibiricus* T.), только в 4-х зарегистрированы пожары. Основная причина пожаров – грозы, за исключением Озерковского участкового лесничества, где все 4 пожара возникли по вине местного населения.

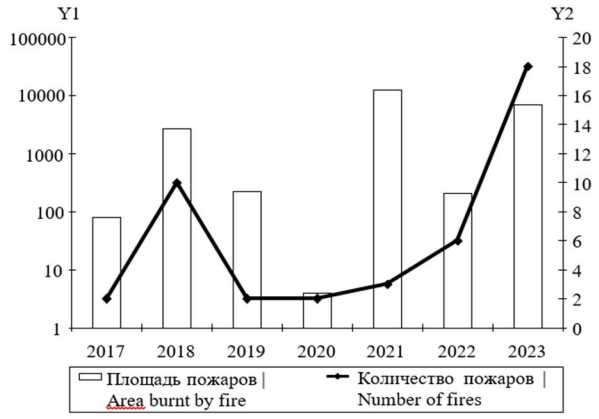


Рисунок 2. Динамика горимости шелкопрядников Енисейского лесничества за 2017–2023 гг.

(по оси X – годы; по оси (логарифмическая шкала) Y1 – площадь пожаров, га; по оси Y2 – количество пожаров, шт.)

Figure 2. Dynamics of forest fire occurrence in forests disturbed by the Siberian moth in the Yeniseyskoe forest management unit from 2017 to 2023 (X-axis – year; (logarithmic scale) Y1-axis – area burnt by fire, ha; Y2-axis – number of fires)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Продолжительность фактического пожароопасного сезона Енисейского лесничества с 2000–2023 гг. колебалось от 31 до 158 дней. Средняя продолжительность фактического пожароопасного сезона с 2000 по 2010 год, включительно, составляла 48 дней. В период с 2011 по 2023 гг. она увеличилась в 2 раза (99 дней). С началом XXI в. в Центральной Сибири отмечается рост площадей и числа пожаров растительности, вызванный изменениями погоды летнего периода [22, 26, 27]. По оценкам многих авторов [21, 28–30] климатические изменения провоцируют увеличение пожароопасного сезона, повышение средних температур летнего периода, изменение циркуляции атмосферы с локальным перераспределением осадков и грозовой активности.

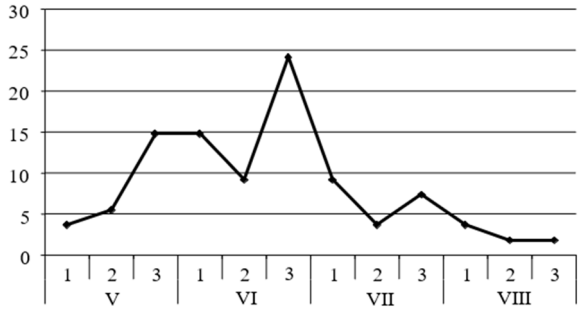


Рисунок 3. Сезонная динамика пожаров шелкопрядниках

(по оси X – месяц (V-VIII – май-август соответственно), декада; по оси Y1 – количество пожаров, %)

Figure 3. Seasonality of fire activity in forests disturbed by the Siberian moth

(X-axis – month (V-VIII – May-August, respectively), ten-day period; Y1-axis – number of fires, %)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Пожары в шелкопрядниках начинаются в первой декаде мая и заканчиваются в третьей декаде августа. Пик горимости с конца мая по первую декаду июля (рисунок 3). Анализ сезонного распределения количества пожаров в темнохвойных насаждениях, не поврежденных сибирским шелкопрядом (*D. sibiricus* T.), показал следующее. Первые пожары выявлены в конце мая 5,2%, июне 31,6%, пик пожаров регистрируется в июле – 52,6%, последние пожары возникают в 3 декаде августа – 10,5%. Возможность возникновения пожаров зависит от влагосодержания лесных горючих материалов, фенологической фазы растительности и хода погодных условий.

Самая высокая антропогенная пожарная опасность наблюдается в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе. По вине человека за пожароопасный сезон, в среднем регистрируется

160 пожаров, что составляет примерно 15% от общего количества пожаров в Центральной Сибири. Общая площадь Среднесибирского подтаежно-лесостепного района 3,45 млн. га, в котором выделено 15 лесничеств. Лесистость территории по лесничествам сильно варьирует: минимальная равна 11,3% (Назаровское лесничество), максимальная – 76,6% (Козульское лесничество). Лесные массивы района представлены насаждениями разнотравной группы типов леса. Транспортная сеть развита хорошо – 4,2 км/тыс. га.

На территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района за исследуемый период зарегистрировано 4337 лесных пожаров [19], на площади свыше 229 тыс. га с колебаниями от 35 до 667 пожаров в год. Доля верховых и почвенных пожаров не значительна. Годовая площадь пожаров в районе между пожароопасными сезонами менялась от 200 га (2000 г.) до 149 тыс. га (2022 г.).

На территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района в 2009 году выявлено воздействие уссурийского полиграфа (*P. proximus* B.) – инвазивный вредитель дальневосточного происхождения, который повреждает в основном ослабленные пихтовые насаждения [34].

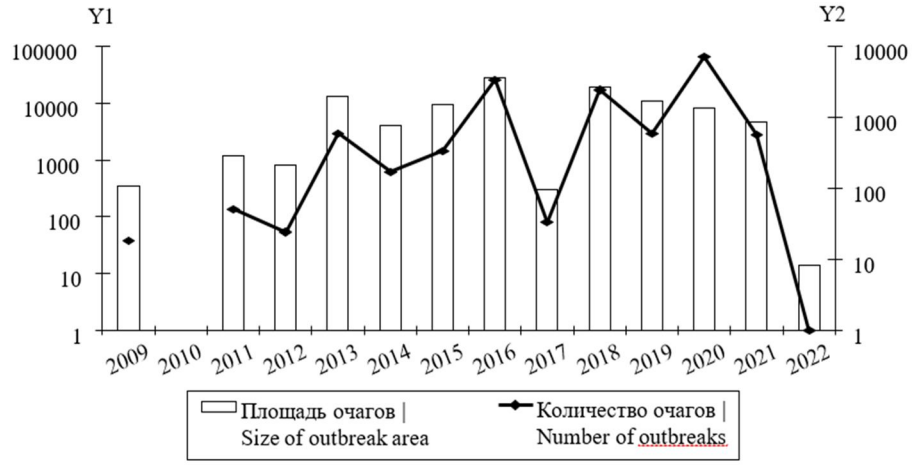


Рисунок 4. Динамика повреждения пихтачей полиграфом уссурийским (*P. proximus* B.) на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района 2009–2022 гг.
(по оси X – годы; составлено с использованием логарифмического масштаба по оси Y1 – площадь очагов, га; по оси Y2 – количество очагов, шт.)

Figure 4. Dynamics of damage to fir trees caused by the four-eyed fir bark beetle (*P. proximus* B.) in the Central Siberian subtaiga/forest-steppe zone from 2009 to 2022
(X-axis – year; plotted using a logarithmic scale; Y1-axis – size of outbreak area, ha; Y2-axis – number of outbreaks)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition



Рисунок 5. Распределение количества пожаров в пихтовых насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским (*P. proximus* В.) на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района 2009–2022 гг. (по оси X – годы; по оси (логарифмическая шкала) Y1 – количество очагов, шт.; по оси Y2 – количество пожаров, шт.)

Figure 5. Number of fires in fir forests disturbed by the four-eyed fir bark beetle (*P. proximus* B.) in the Central Siberian subtaiga/forest-steppe zone from 2009 to 2022 (X-axis – year; (logarithmic scale) Y1-axis – number of outbreaks; Y2-axis – number of fires)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Первые очаги уссурийского полиграфа (*P. proximus* В.) обнаружены на территории трех лесничеств: Козульское – 724,5 га, Ачинское – 753,5 га и Боготольское – 474,6 га. За 2009–2022 годы в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе выявлено более 15 тыс. очагов воздействия полиграфа уссурийского (*P. proximus* В.). Ежегодно в среднем выявлялось 1089 очагов, с колебаниями от 1 до 3364 очагов в год. За исследуемый период общая площадь поврежденных и усохших насаждений составила более 99,8 тыс. га (рисунок 4). Площадь очагов варьировала от 0,1 га до более 10000 га.

На территории лесного района в пихтовых насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом (*P. proximus* В.) с 2016 по 2023 год, зарегистрировано 76 пожаров (рисунок 5), т.е. ежегодно возникало в среднем 9 лесных пожаров с колебаниями от 4 до 21. Анализ динамики количества лесных пожаров показал, что пожары в очагах полиграфа уссурийского (*P. proximus* В.) стали возникать с 2016 года, т. е. на восьмой год после повреждения.

В отличие от сибирского шелкопряда (*D. sibiricus* Т.), который разово уничтожает полностью хвою, и вызывает зачастую или полную гибель древостоя, или выпадение из состава темнохвойного элемента, уссурийский полиграф (*P. proximus* В.) является короедом, личинки которого повреждают в первую очередь луб и заболонь дерева. Вредитель может несколько раз атаковать условно здоровое дерево, которое активно заливает первые волны жуков смолой. Однако в симбиотических отношениях с данным видом вредителя находятся офиостомовые грибы дальневосточного происхождения (как и переносчик), которые акклиматизировались и обладают очень высокой фитопатогенной активностью в отношении пихтовых древостоев и вызывают некроз тканей деревьев, это вызывает необратимое сильное ослабление с последующим усыханием и гибелью.

Процесс занимает продолжительное время и не касается кроны на момент инвазии вредителя. Процесс перехода от первой категории санитарного состояния до старого сухостоя может занимать несколько лет. Точные сроки зависят от климатических особенностей, сопутствующих болезней и состояния.

Что касается пожарной опасности, то значительные изменение и повышение её происходят после опадения сухой хвои, что значительно увеличивает объем ЛГМ, наряду с имеющимся. Далее повторяется сценарий вышеописанный с шелкопрядом.

Отличие между процессами увеличения пожарной опасности территорий, поврежденных описанными вредителями, заключается в скорости потери хвойной части древостоев. В случае с шелкопрядом (*D. sibiricus* Т.) усыхание происходит после дефолиации интенсивнее, что значительнее повышает скорость созревания территорий. В случае с полиграфом (*P. proximus* В.), сначала

несколько лет идет опад хвойной части, а после этого возникает риск возгорания. Характер во втором случае более плавный, так как продолжительность в несколько раз больше, чем в первом.

Численность пожаров возрастает под влиянием увеличения площади очагов полиграфа уссурийского (*P. proximus* B.) и недостаточностью профилактических мероприятий (рисунок 6). За период 2016–2023 гг. общая лесная площадь, пройденная пожарами, в поврежденных насаждениях составила 9372 га или по 1171,5 га в среднем в год при среднем уровне горимости 1173,3 га на 100 тыс. га, что составляет 1,17% от площади поврежденных насаждений в год. Максимальная площадь пожаров зафиксирована в 2022 г. – 8,2 тыс. га (рисунок 7).

Повышенная горимость в 2022 году обусловлена сухой ветреной погодой в конце весны. В результате этого произошло быстрое высыхание лесных горючих материалов в большинстве очагов полиграфа уссурийского (*P. proximus* B.), что привело к возникновению 21 пожара, а также усложнило борьбу с пожарами.

В Большемуртинском лесничестве 19.05.2022 г. в очаге полиграфа уссурийского (*P. proximus* B.) обнаружен пожар на площади 5 га, а потушили его только 27.05.2022 г. на площади 6078 га. Этот пожар повлиял на статистику горимости лесного района.

Анализ лесопожарной статистики показал, что в лесном районе наблюдается увеличение средней площади пожаров в поврежденных насаждениях уссурийским полиграфом (*P.* proximus B.). Средняя площадь одного пожара в 2022 г. – 394 га, за 6 лет с 2016–2021 гг. – 22,7 га, а за 2023 г. – 7,4 га.

Подекадный анализ распределения количества пожаров в поврежденных насаждениях показал, что первые пожары возникают в третьей декаде апреля. Период повышенной пожарной опасности в насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским (P. proximus B.), продолжается не весь пожароопасный сезон. Как правило, он приходится на апрель-май, в это время возникает в среднем 76% пожаров. Наиболее напряженным в пожарном отношении является первая декада мая – 26% от годовых показателей (рисунок 8).



Рисунок 6. Динамика накопления количества очагов (за 2009–2022 гг.) и пожаров (за 2016–2023 гг.) в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе
(по оси X – годы; по оси Y1 – накопительная частота, %)

Figure 6. Number of outbreaks (from 2009 to 2022) and number of fires (from 2016 to 2023) in the Central Siberian subtaiga/forest-steppe zone
(X-axis – year; Y1-axis – cumulative frequency, %)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

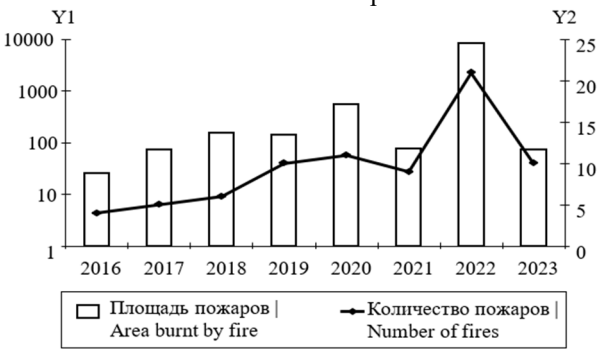


Рисунок 7. Динамика горимости пихтовых насаждений, поврежденных полиграфом уссурийским (*P. proximus* B.), в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе за 2016–2023 гг.
(по оси X – годы; по оси (логарифмическая шкала) Y1 – площадь пожаров, га.; по оси Y2 – количество пожаров, шт.)

Figure 7. Dynamics of forest fire occurrence in fir forests disturbed by the four-eyed fir bark beetle (*P. proximus* B.) in the Central Siberian subtaiga/forest-steppe zone from 2016 to 2023 (X-axis – year; (logarithmic scale) Y1-axis – area burnt by fire, ha; Y2-axis – number of fires)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

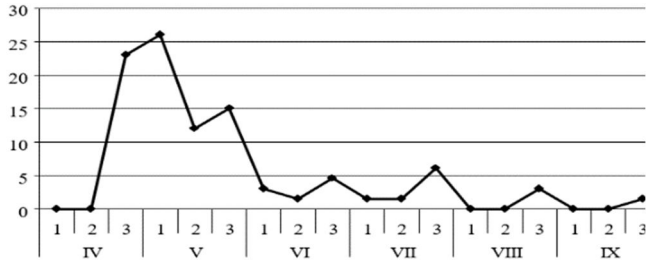


Рисунок 8. Сезонная динамика пожаров в пихтовых насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским (*P. proximus* B.)

(по оси X – месяц (IV-IX – апрель-сентябрь соответственно), декада; по оси Y1 – количество ожаров, %)

Figure 8. Seasonality of fire activity in fir forests disturbed by the four-eyed fir bark beetle (*P. proximus* B.)

(X-axis – month (V-VIII – May-August, respectively), ten-day period; Y1-axis – number of fires, %)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 1

Средняя продолжительность пожароопасного периода в пихтовых насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом (*P. proximus* B.)

Table 1

Average duration of fire danger period in fir forests disturbed by the four-eyed fir bark beetle (*P. proximus* B.)

Лесничество | Forest management unit	Дата первого пожара | Date of the first fire	Дата последнего пожара | Date of the last fire	Продолжительность пожароопасного периода, дней | Fire danger period, days
Ачинское | Achinskoe	12.05	22.05	11
Большемуртинское | Bol'shemurtinskoe	19.05	06.07	49
Большеулуйское | Bol'sheulujskoe	20.04	28.05	39
Дзержинское | Dzerzhinskoe	18.05	27.08	102
Емельяновское | Emel'yanovskoe	11.05	09.09	90
Иланское | Ilanskoe	23.04	31.05	39
Сухобузимское | Sukhobuzimskoe	29.04	17.08	111

За исследуемый период установлено, что средняя продолжительность пожароопасного периода в пихтовых насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским (P. proximus B.), возрастает с запада на восток (таблица 1). Так в Ачинском лесничестве он в среднем составляет 11 дней, в Емельяновском – 90, в Дзержинском – 102 дня. Показатель продолжительности пожароопасного периода не всегда отвечает действительности. Он зависит от распределения количества осадков в теплый период года, от появления источников огня, от профилактических мероприятий в охране лесов.

Как описано выше, территория лесного района занимает 3,45 млн. га, в котором организовано 15 лесничеств, где встречается большое разнообразие природных условий и различная степень хозяйственного освоения территорий этих лесничеств. Данные факторы обуславливают различную степень повреждения насаждений энтомовредителями, продолжительность пожароопасных сезонов и периодов, а также различную горимость. В таблице 2 приведены средние многолетние показатели горимости пихтовых насаждений, поврежденных полиграфом уссурийским (*P. proximus* B.) по лесничествам.

По частоте возникновения пожаров наиболее благополучным является Козульское лесничество. В расчете на 100 тыс. га здесь возникает менее 1 пожара. Это можно объяснить тем, что рельеф лесничества расчленен системой рек на ряд

широких водоразделов с плоскими вершинами и в летний период здесь выпадает более 200 мм осадков, а также низкая плотность населения 3 чел./км^2 [32].

Иланское лесничество характеризуется максимальной частотой и горимостью поврежденных насаждений полиграфом уссурийским (*P. proximus* B.).

Таблица 2

Средние многолетние показатели горимости насаждений, поврежденных полиграфом уссурийским (*P. proximus* B.) за 2016–2023 гг.

Table 2

Average long-term dynamics of forest fire occurrence in forests disturbed by the four-eyed fir bark beetle (*P. proximus* B.) from 2016 to 2023

Лесничество | Forest management unit	Количество очагов, шт. | Number of outbreaks	Площадь очагов, га | Size of outbreak area, ha	Средняя площадь очага, га | Average size of outbreak area, ha	Количество пожаров, шт. | Number of fires	Площадь пожаров, га | Area burnt by fire, ha	Средняя площадь пожара за сезон, га | Average area burnt by fire during the season, ha	Частота пожаров шт. на 100 тыс. га за сезон | Fire frequency, number of fires per 100 thousand hectares per season	Площадь пожаров га на 100 тыс. га за сезон | Area burnt by fire, ha per 100 thousand hectares per season
Ачинское | Achinskoe	776	13217	17,0	6	289	6,0	5,6	273,3
Большемуртинское | Bol'shemurtinskoe	7677	15043	1,9	8	6209	97,0	6,6	644,9
Большеулуйское | Bol'sheulujskoe	616	5473	8,8	11	55	0,6	25,1	125,6
Дзержинское | Dzerzhinskoe	320	4136	12,9	5	177	2,9	15,1	534,9
Емельяновское | Emel'yanovskoe	1688	23342	13,8	5	1201	30,0	2,6	643,1
Иланское | Ilanskoe	186	2158	11,6	32	602	2,3	185,3	3487,0
Канское | Kanskoe	673	6212	9,2	1	380	47,5	2,0	764,6
Козульское | Kozul'skoe	1239	14285	11,5	1	174	21,7	0,9	152,2
Красноярское | Krasnoyarskoe	109	1779	16,3	2	2	0,1	14,0	14,0
Назаровское | Nazarovskoe	1215	4901	4,0	1	1	0,1	2,5	2,5
Сухобузимское | Sukhobuzimskoe	271	1782	6,5	4	282	8,8	28,0	1978,1

В перспективе в восточной части лесного района можно ожидать увеличения числа пожаров и горимости.

Выводы

В результате анализа и обработки документальных данных получен ряд выводов:

– На территории Центральной Сибири в период с 2000 по 2023 гг. зарегистрировано около 27 тыс. пожаров, общая лесная площадь, пройденная огнем, составила порядка 4,8 млн га, а средняя площадь одного пожара 177 га. Данные количественно свидетельствуют об увеличении числа и площади пожаров на территории в период с 2012 по 2023 годы.

– Замеченные максимумы числа пожаров в отдельные годы обусловлены устойчивыми продолжительными антициклонами с сухой и ветренной погодой.

– Территориальное распределение пожаров отражает неравномерность распространения: 62,4% по числу и 57,5% по площади отмечено в таёжном зоне, что обусловлено произрастанием в основном сосновых лесов и большим количеством вырубок.

– Максимальная относительная площадь поврежденных насаждений насекомыми отмечалась в Западно-Сибирском средне-таежном равнинном районе (487 га на 100 тыс. га), Западно-Сибирском южно-таежном равнинном районе (849 га на 100 тыс. га) и в Среднесибирском подтаеж-но-лесостепном районе (158 га на 100 тыс. га).

– В первых двух лесных районах основной причиной усыхания является сибирский шелкопряд (*D. sibiricus* Т.), в последнем – полиграф уссурийский (*P. Proximus* В.).

– Выявлено, что в насаждениях, поврежденных энтомовредителями возрастает опасность возникновения лесных пожаров: в шелкопрядниках частота пожаров на 100 тыс. га увеличилась в 1,8 раз в темнохвойных насаждениях и оценивалась как умеренная; в полиграфниках – в 41% случаев характеризуется как очень высокая (свыше 300 га/100 тыс. га).

– Риск возникновения пожаров увеличивается в темнохвойных насаждениях через 2 года после повреждения их сибирским шелкопрядом (*D. sibiricus* Т.). На территории Енисейского лесничества замечены увеличения, до начала вспышки в период с 2007–2014 гг., частоты пожаров в пихтовых насаждениях с 0,1 шт. на 100 тыс. га за сезон до 0,6; а средней площади пожара – в 8 раз (523,6 га).

– Отмечен колебательный характер во времени показателей горимости на территории Енисейского лесничества. Корреляционный анализ показал слабую взаимосвязь погодных условий и показателей горимости (0,23), что связано с гидрологическими показателями и рельефом территории. Для получения более тесной взаимосвязи необходимо получение локальных микроклиматических характеристик.

– В пихтовых насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским (*P. proximus* В.), в основном возникновение пожаров приходиться на 8-ой год после повреждения. На территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района в 2009 году выявлено воздействие уссурийского полиграфа (*P. proximus* В.), а с 2016 года наблюдается стабильное увеличение количества и площади пожаров.

– Выявленная положительная динамика площадей поврежденных вредителями насаждений и связанная с ней горимость позволяют прогнозировать дальнейший рост пожарной нагрузки в регионах при сохранении текущей системы лесозащиты и противопожарной охраны лесов (обнаруженный пожар в Большемуртинском лесничестве на площади 5 га за неделю распространился и был потушен на площади более 6 тыс.).

– В Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе наблюдалось увеличение средней площади пожаров в поврежденных насаждениях: с 2016–2021 гг. – 22,7 га, в 2022 г. – 394 га.

– Установлено, что на территории полиграфников средняя продолжительность пожароопасного сезона возрастает с запада на восток (Ачинском лесничестве он в среднем составляет 11 дней, в Емельяновском – 90, в Дзержинском – 102 дня.), что предполагает увеличение числа пожаров и горимости в будущем преимущественно в восточной зоне лесного района.

– Отмечается возрастание численности пожаров под влиянием увеличения площади очагов как полиграфа уссурийского (*P. proximus* B.), так и сибирского шелкопряда (*D. sibiricus* T.). Значительные поврежденные территории усыхают с течением времени (8 лет и 2 года, соответственно), что благоприятно влияет на распространение пожаров.

При современном уровне охраны лесов следует ожидать увеличения числа пожаров и относительной горимости в насаждениях, поврежденных энтомовредителями. Для предотвращения негативного сценария необходима разработка комплекса профилактических и хозяйственных мероприятий органами лесного хозяйства.

Список литературы

1. Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 50-61. – URL: http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/210.
2. Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. – 2021. – № 5. – С. 531-546. – DOI: http://doi.org/10.31857/S0024114821050077. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S0024114821050077.
3. Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород европейского севера России // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2022. – № 2. – С. 9-25. – DOI: http://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-9-25. – URL: https://journals.narfu.ru/index.php/fj/article/view/923.
4. Chen J., Wang X., Yu Y., Yuan X., Quan X., Huang H. Improved Prediction of Forest Fire Risk in Central and Northern China by a Time-Decaying Precipitation Model. *Forests*. 2022; 13 (3), 480. – DOI: http://doi.org/10.3390/f13030480.
5. Lohmander P., Mohammadi Z., Kaљpar J., Tahri M., Вегибk R., Holuљa J., Maruљbk R. Future forest fires as functions of climate change and attack time for central Bohemian region, Czech Republic. *Annals of forest research*. 2022; 65 (1), p. 17-30. – DOI: http://doi.org/10.15287/afr.2022.2183.
6. Pokharel R., Latta G., Ohrel S.B. Estimating Climate-Sensitive Wildfire Risk and Tree Mortality Models for Use in Broad-Scale U.S. Forest Carbon Projections. *Forests.* 2023; 14 (2), 302. – DOI: http://doi.org/10.3390/f14020302.
7. Quan D., Quan H., Zhu W., Lin Z., Jin R. A Comparative Study on the Drivers of Forest Fires in Different Countries in the Cross-Border Area between China, North Korea and Russia. *Forests*, 2022; 13 (11), 1939. – DOI: http://doi.org/10.3390/f13111939.
8. Жила С.В., И.В. Фуряев, Ковалева Н.М. Оценка запасов лесных горючих материалов в поврежденных полиграфом уссурийским пихтовых древостоях Красноярского края // Сибирский лесной журнал. – 2023. – № 6. – С. 76-84. – DOI: http://doi.org/10.15372/SJFS20230608.
9. Гераськина А.П., Тебенькова Д.Н., Ершов Д.В., Ручинская Е.В., Сибирцева Н.В., Лукина Н.В. Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т. 4. – № 2. – DOI: http://doi.org/10.31509/2658-607x-202142-11. – URL: https://jfsi.ru/4-2-2021-geraskina_et_al/.
10. Cessna J., Alonzo M.G., Foster A.C., Cook B.D. Mapping Boreal Forest Spruce Beetle Health Status at the Individual Crown Scale Using Fused Spectral and Structural Data. *Forests*, 2021; 12 (9), 1145. – DOI: https://doi.org/10.3390/f12091145.
11. Слинкина О.А. Определение состояния темнохвойных лесов, поврежденных энтомовредителями, по спутниковым данным // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29. – № 2. – С. 51-61. – DOI: http://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-2-51-61. – URL: https://www.researchgate.net/publication/380148122.
12. Баранчиков Ю.Н. Взаимодействие науки и практики в защите таёжных лесов Красноярского края: вспышка массового размножения сибирского шелкопряда в конце 1960-х // Сибирский лесной журнал. – 2021. – № 5. – С. 92-100. – DOI: http://doi.org/10.15372/SJFS20210510. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47385694.

13. Сультсон С.М., Михайлов П.В., Горошко А.А., Демидко Д.А., Кулакова Н.Н., Слинкина О.А., Татаринцев А.И. Экологическая характеристика резерваций сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus*) (Insecta, Lasiocampidae) в условиях Алтае-Саянского горно-таежного лесного района // Поволжский экологический журнал. – 2024. – № 1. – С. 64-78. – DOI: https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-1-64-78. – URL: https://sevin.elpub.ru/jour/article/view/524.
14. Kovalev A., Soukhovolsky V. Analysis of Forest Stand Resistance to Insect Attack According to Remote Sensing Data. *Forests*, 2021; 12 (9), 1188. – DOI: https://doi.org/10.3390/f12091188.
15. Duarte A., Borralho N., Cabral P., Caetano M. Recent Advances in Forest Insect Pests and Diseases Monitoring Using UAV-Based Data: A Systematic Review. *Forests*, 2022; 13 (6), 911. – DOI: https://doi.org/10.3390/f13060911.
16. Москальченко С.А., Пономарёв Е.И., Иванов А.В. Горимость лесов Красноярского края в современных условиях // Хвойные бореальной зоны. – 2014. Т. 32 – №1-2. – С. 33-39. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24957384.
17. Подрезов Ю.В. Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2023. – № 2(392). – С. 172-182. – DOI: http://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-172-182. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50793233.
18. Пармузин Ю.П. Средняя Сибирь. Очерк природы. – Москва: Издательство социально-экономической литературы «Мысль», 1964. – 313 с.
19. Блок мониторинга пожарной опасности. – Текст: электронный. // Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства – [сайт]. – URL: https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml (дата обращения: 11.08.2024).
20. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирологическое районирование в таежной зоне. – Новосибирск: Наука, 1990. – 204 с.
21. Валендик Э.Н., Кисиляхов Е.К., Рыжкова В.А., Пономарёв Е.И., Данилова И.В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // География и природные ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 52-59. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21273682.
22. Ponomarev E.I., Yakimov N.D., Ponomareva T.V., Yakubailik O.E., Conard S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia. *Atmosphere*. 2021; 12(5), 559. – DOI: http://doi.org/10.3390/atmos12050559. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46088164.
23. Sul'tson S.M., Mikhaylov P.V., Kulakov S.S., Goroshko A.A. Opportunities for assessing the risk of an outbreak of Siberian silkworm (*Dendrolimus superans sibiricus* Tschetv.) in taiga forests // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020 – Vol. 548, – p. 52051. – DOI: http://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052051. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/5/052051.
24. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Демидко Д.А., Петько В.М., Баранчиков Ю.Н. Распространение уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Сибири // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2015. – №. 211. – С. 33-45. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23815854.
25. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Волкова Е.С., Астапенко С.А. [и др.] Обзор современного вторичного ареала уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации. // Российский журнал биологических инвазий. – 2024. – № 1. – С. 49-69. – DOI: http://doi.org/10.35885/1996-1499-17-1-49-69. – URL: https://invasjour.sev-in.ru/issues/2024_1.html.
26. Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 2021; 50 (11), p. 1953-1974. – DOI: https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x.
27. Hayasaka H. Rare and Extreme Wildland Fire in Sakha in 2021. *Atmosphere*, 2021; 12 (12), p. 1572. – DOI: https://doi.org/10.3390/atmos12121572.

28. Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Оценки тенденций усиления лесных пожаров в России до конца XXI в. по данным сценарных экспериментов климатических моделей пятого поколения // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 5. – С. 17-30.
29. Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н. Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI в.: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 2. – С. 5–22.
30. Romps D., Seeley J., Vollaro D., Molinari J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science*, 2014; 346 (6211), p. 851-854. – DOI: https://doi.org/10.1126/science.1259100.
31. Popova V., Fedonova P., Sultson S., Kulakova N., Mikhailov P., Khizhniak N. The impact of quarantine pests on forest health in Krasnoyarsk krai // BIO Web of Conferences, 2024. – Vol. 116, 03029. – DOI: https://doi.org/10.1051/bioconf/202411600001.
32. Демографический ежегодник Красноярского края / Красноярское территориальное управление Федеральной службы государственной статистики. – Красноярск: Красноярскстат, 2020. – 202 с.

References

1. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii [Climate change and forest fires in Russia]. Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science]. 2013; No. 5: 50-61. (In Russ.). URL: http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/210.
2. Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Yu., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M. Rol' lesov v adaptatsii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata [The role of forests in the adaptation of natural systems to climate change]. Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science]. 2021; No. 5: 531-546. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.31857/S0024114821050077.
3. Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Izmenenie klimata i ego vliyanie na adaptatsiyu i vnutrividovuyu izmenchivost' khvoynykh porod evropeyskogo severa Rossii [Climate change and its impact on adaptation and intraspecific variability of coniferous species in the European north of Russia]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal [Russian Forestry Journal]. 2022; No. 2: 9-25. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-9-25.
4. Chen J., Wang X., Yu Y., Yuan X., Quan X., Huang H. Improved Prediction of Forest Fire Risk in Central and Northern China by a Time-Decaying Precipitation Model. Forests. 2022; 13 (3): 480. DOI: http://doi.org/10.3390/f13030480.
5. Lohmander P., Mohammadi Z., Kašpar J., Tahri M., Beráněk R., Holuša J., Marušák R. Future forest fires as functions of climate change and attack time for central Bohemian region, Czech Republic. Annals of forest research. 2022; 65 (1): 17-30. DOI: http://doi.org/10.15287/afr.2022.2183.
6. Pokharel R., Latta G., Ohrel S.B. Estimating Climate-Sensitive Wildfire Risk and Tree Mortality Models for Use in Broad-Scale U.S. Forest Carbon Projections. Forests. 2023; 14 (2): 302. DOI: http://doi.org/10.3390/f14020302.
7. Quan D., Quan H., Zhu W., Lin Z., Jin R. A Comparative Study on the Drivers of Forest Fires in Different Countries in the Cross-Border Area between China, North Korea and Russia. Forests. 2022; 13 (11): 1939. DOI: http://doi.org/10.3390/f13111939.
8. Zhila S.V., Furyaev I.V., Kovaleva N.M. Otsenka zapasov lesnykh goryuchikh materialov v povrezhdennykh poligrafom ussuriyskim pikhtovykh drevostoyakh Krasnoyarskogo kraya [Assessment of forest fuel loads in fir stands of Krasnoyarsk krai damaged by the Ussuri bark beetle]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Russian Journal of Forest Science]. 2023; No. 6: 76-84. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.15372/SJFS20230608.
9. Geraskina A.P., Tebenkova D.N., Ershov D.V., Ruchinskaya E.V., Sibirtseva N.V., Lukina N.V. Pozhary kak faktor utraty bioraznoobraziya i funktsiy lesnykh ekosistem [Fires as a factor of biodiversity and forest ecosystems functions loss]. Voprosy lesnoy nauki [Forest Science Issues]. 2021; 4 (2). (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.31509/2658-607x-202142-11.

10. Cessna J., Alonzo M.G., Foster A.C., Cook B.D. Mapping Boreal Forest Spruce Beetle Health Status at the Individual Crown Scale Using Fused Spectral and Structural Data. Forests. 2021; 12 (9): 1145. DOI: https://doi.org/10.3390/f12091145.
11. Slinkina O.A. Opredelenie sostoyaniya temnokhvoynykh lesov, povrezhdennykh entomovreditelyami, po sputnikovym dannym [Determination of the state of dark coniferous forests damaged by insect pests using satellite data]. Vestnik SSUGT [Bulletin of SSUGT]. 2024; 29 (2): 51-61. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-2-51-61.
12. Baranchikov Yu.N. Vzaimodeystvie nauki i praktiki v zashchite tayozhnykh lesov Krasnoyarskogo kraya: vspyshka massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada v kontse 1960-kh [Interaction of science and practice in protection of taiga forests of Krasnoyarsk krai: the outbreak of the Siberian silk moth in the late 1960s]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Russian Journal of Forest Science]. 2021; No. 5: 92-100. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.15372/SJFS20210510.
13. Sultson S.M., Mikhaylov P.V., Goroshko A.A., Demidko D.A., Kulakova N.N., Slinkina O.A., Tatarintsev A.I. Ekologicheskaya kharakteristika rezervatsiy sibirskogo shelkopryada (Dendrolimus sibiricus) (Insecta, Lasiocampidae) v usloviyaykh Altae-Sayanskogo gorno-tayozhnogo lesnogo rayona [Ecological characteristics of the Siberian silk moth (Dendrolimus sibiricus) (Insecta, Lasiocampidae) reservations in the Altai-Sayan mountain taiga forest region]. Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal [Povolzhsky Journal of Ecology]. 2024; No. 1: 64-78. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-1-64-78.
14. Kovalev A., Soukhovolsky V. Analysis of Forest Stand Resistance to Insect Attack According to Remote Sensing Data. Forests. 2021; 12 (9): 1188. DOI: https://doi.org/10.3390/f12091188.
15. Duarte A., Borralho N., Cabral P., Caetano M. Recent Advances in Forest Insect Pests and Diseases Monitoring Using UAV-Based Data: A Systematic Review. Forests. 2022; 13 (6): 911. DOI: https://doi.org/10.3390/f13060911.
16. Moskalchenko S.A., Ponomarev E.I., Ivanov A.V. Gorimost' lesov Krasnoyarskogo kraya v sovremennykh usloviyakh [Forest fire danger in Krasnoyarsk krai under modern conditions]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the Boreal Zone]. 2014; 32 (1-2): 33-39. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24957384.
17. Podrezov Yu.V. Osnovnye napravleniya preduprezhdeniya chrezvychaynykh lesopozharnykh situatsiy [The main directions of emergency forest fire situations prevention]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal [Russian Forestry Journal]. 2023; No. 2 (392): 172-182. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-172-182.
18. Parmuzin Yu.P. Srednyaya Sibir'. Ocherk prirody [Middle Siberia. Essay on nature]. Moscow: Mysl' Publishing House; 1964. 313 p. (In Russ.).
19. Blok monitoringa pozharnoy opasnosti [Fire danger monitoring unit]. Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva [Information system of remote monitoring of the Federal Forestry Agency]. Available at: https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml (accessed: 11.08.2024). (In Russ.).
20. Sofronov M.A., Volokitina A.V. Pirologicheskoy rayonirovanie v tayozhnoy zone [Pyrological zoning in the taiga zone]. Novosibirsk: Nauka; 1990. 204 p. (In Russ.).
21. Valendik E.N., Kisilyakhov E.K., Ryzhkova V.A., Ponomarev E.I., Danilova I.V. Krupnye pozhar y v tayozhnykh landshaftakh Tsentral'noy Sibiri [Large fires in the taiga landscapes of Central Siberia]. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]. 2014; No. 1: 52-59. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21273682.
22. Ponomarev E.I., Yakimov N.D., Ponomareva T.V., Yakubailik O.E., Conard S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia. Atmosphere. 2021; 12 (5): 559. DOI: http://doi.org/10.3390/atmos12050559.
23. Sul'tson S.M., Mikhaylov P.V., Kulakov S.S., Goroshko A.A. Opportunities for assessing the risk of an outbreak of Siberian silkworm (Dendrolimus superans sibiricus Tschetv.) in taiga forests. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 548: 052051. DOI: http://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052051.
24. Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Demidko D.A., Pet'ko V.M., Baranchikov Yu.N. Rasprostranenie ussuriyskogo poligrafa Polygraphus proximus Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) v Sibiri [Spread of

the four-eyed fir bark beetle Polygraphus proximus Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Siberia]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy]. 2015; No. 211: 33-45. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23815854.

25. Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Astapenko S.A. [et al.] Obzor sovremennogo vtorichnogo areala ussuriyskogo poligrafa (Polygraphus proximus Blandford) na territorii Rossiyskoy Federatsii [Review of the current secondary range of the Ussurian polygraph (Polygraphus proximus Blandford) in the Russian Federation]. Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy [Russian Journal of Biological Invasions]. 2024; No. 1: 49-69. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.35885/1996-1499-17-1-49-69.
26. Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga. Ambio. 2021; 50 (11): 1953-1974. DOI: https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x.
27. Hayasaka H. Rare and Extreme Wildland Fire in Sakha in 2021. Atmosphere. 2021; 12 (12): 1572. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos12121572.
28. Sherstyukov B.G., Sherstyukov A.B. Otsenki tendentsiy usileniya lesnykh pozharov v Rossii do kontsa XXI v. po dannym stsenarnykh eksperimentov klimaticheskikh modeley pyatogo pokoleniya [Assessments of trends in the intensification of forest fires in Russia until the end of the 21st century based on scenario experiments with fifth-generation climate models]. Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]. 2014; No. 5: 17-30. (In Russ.).
29. Shkolnik I.M., Meleshko V.P., Efimov S.V., Stafeva E.N. Izmeneniya ekstremal'nosti klimata na territorii Sibiri k seredine XXI v.: ansamblevyy prognoz po regional'noy modeli GGO [Changes in climate extremes over Siberia by the mid-21st century: An ensemble forecast using the Voeikov Main Geophysical Observatory regional model]. Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]. 2012; No. 2: 5-22. (In Russ.).
30. Romps D., Seeley J., Vollaro D., Molinari J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science. 2014; 346 (6211): 851-854. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1259100.
31. Popova V., Fedonova P., Sultson S., Kulakova N., Mikhailov P., Khizhniak N. The impact of quarantine pests on forest health in Krasnoyarsk krai. BIO Web of Conferences. 2024; 116: 03029. DOI: https://doi.org/10.1051/bioconf/202411600001.
32. Demograficheskiy ezhegodnik Krasnoyarskogo kraya [Demographic Yearbook of the Krasnoyarsk Territory]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskstat; 2020. 202 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Мельник Александра Игоревна* – старший преподаватель кафедры лесного хозяйства и природопользования ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037 Российская Федерация, младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», ORCID 0000-0002-1673-1639, e-mail: aleksandruna2013@gmail.com.

Вайс Андрей Андреевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесного хозяйства и природопользования ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037 Российская Федерация, ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», ORCID 0000-0003-4965-3670, e-mail: vais6365@mail.ru.

Михайлов Павел Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий кафедры лесного хозяйства и природопользования ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037 Российская Федерация, ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», ORCID 0000-0003-3967-0709, e-mail: mihaylov.p.v@mail.ru.

Селиванов Владислав Витальевич – инженер лаборатории «Лесных экосистем», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037 Российская Федерация, e-mail: selivan23.04@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Aleksandra I. Melnik* – senior lecturer of the Department of Forestry and Natural Resource Management in FSBEI HE «Reshetnev Siberian State University of Science and Technology», Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, junior researcher in Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, ORCID 0000-0002-1673-1639, e-mail: aleksandruna2013@gmail.com.

Andrey A. Vais – DSc (Agric.), Professor of the Department of Forestry and Natural Resource Management in FSBEI HE «Reshetnev Siberian State University of Science and Technology», Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, leading researcher in Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, ORCID 0000-0003-4965-3670, e-mail: vais6365@mail.ru.

Pavel V. Mikhailov – CSc (Agric.), Head of the Department of Forestry and Natural Resource Management in FSBEI HE «Reshetnev Siberian State University of Science and Technology», Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, leading researcher in Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, ORCID 0000-0003-3967-0709, e-mail: mihaylov.p.v@mail.ru.

Vladislav V. Selivanov – technician in Scientific Laboratory of Forest Ecosystems, FSBEI HE «Reshetnev Siberian State University of Science and Technology», Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation 660037, e-mail: selivan23.04@mail.ru.

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/12
УДК. 630* 581.14:582.681.81

Развитие проростков *Quercus robur* L. на ранних этапах онтогенеза

Н.А. Павлюк[1]✉, Pavlnat67@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-7556-313X
Е.А. Павлюк[2], mazahaka40@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-8948-5830

[1]*ФГБУН Ботанический сад-институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Маковского, 142, г. Владивосток, Приморский край, 690024, Российская Федерация*
[2] *ООО "Хагери антар", пр. Адонца, 6/1, г. Ереван, 0001, Армения*

В коллекции древесных растений Ботанического сада-института ДВО РАН *Q. robur* не был представлен. Успешных попыток интродукции вида на Дальнем Востоке ранее не отмечено. Поэтому нами начато исследование возможности интродукции Q. *robur* в Приморском крае. Желуди для посева были собраны в зеленых насаждениях города Еревана, Армения (парк Поплавок). Сбор желудей произведен через 2 месяца после массового опадения плодов 29 ноября 2023 г. Объем выборки более 100 штук. Определен вид дуба как *Q. robur* f. *praecox.* Исследованы посевные качества желудей. Масса 1000 желудей в нашем исследовании составила 8370 г. Диаметр их варьировал от 16 до 23 мм (в среднем 21 мм), высота 39.4 (36–43) мм. Показатель всхожести желудей, определенный при разных сроках хранения, от 60 до 90 %. Всхожесть желудей после хранения при низкой положительной температуре увеличилась (до 90%), что свидетельствует о высоком качестве желудей. Представлены результаты изучения развития проростков на раннем этапе онтогенеза. Корень начинает расти сразу после посадки, достигает к 2 месяцам 250 мм длины, боковые корни - 10–30 мм. Всходы появились через 2 месяца после начала роста корня. Через 2,5 месяца от посева высота эпикотиля в среднем 60–70 мм. Пикировка и пересадка сеянцев задерживали рост побега и/или стимулировали образование дополнительных побегов, второй побег образовался у 30 %, третий – у 10% проростков. Высота побега одногодичных сеянцев, при выращивании в помещении составила 20,8 (11–35) см, у высаженных в открытый грунт - 15 (6–25) см. Листопад у высаженных в грунт растений наступил в последней декаде октября, при устойчивом понижении среднесуточной температуры воздуха до +12°С. В комнатных условиях безлистный период наступил в январе и длился 20 дней. Данные получены за 1,5 года. Фенологические наблюдения проводили с ноября 2023 по настоящее время. Часть однолетних сеянцев была высажена в открытый грунт для выяснения в дальнейшем возможности их перезимовки в регионе. Фотографии, приведенные в статье, выполнены авторами.

Ключевые слова: *Приморский край, Ботанический сад, интродукция, жёлуди, дуб черешчатый, Quercus robur* L., *посевные качества, всхожесть, жизнеспособность, проростки*

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада-института Дальневосточного отделения Российской академии наук по теме: "Введение в культуру, изучение и сохранение генетических ресурсов хозяйственно ценных растений Восточной Азии" на 2022-2026 гг. № ЕГИСУ НИОКТР: 122040800086-1 (FWFR-2022- 0007).

Благодарности: авторы выражают признательность коллегам Дудкину Р.В., Калинкиной В.А., Колдаевой М.Н, Нестеровой С.В., Пшенниковой Л.М., консультировавшим работу в процессе ее написания. Определить вид дуба по плодам как *Q. robur* L. помог Ю.Е. Пайтян - сотрудник Ереванского ботанического сада. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Павлюк Н.А. Развитие проростков *Quercus robur* L. на ранних этапах онтогенеза / Н.А. Павлюк, Е.А. Павлюк // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 202-214. – Библиогр.: с. 210-214 (25 назв.). – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/12.

Поступила 01.08.2025. ***Пересмотрена*** 22.11.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

(*Article)*

Development of seedlings of Quercus robur L. in the early stages of ontogenesis

N.A. Pavlyuk✉, Pavlnat67@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-7556-313X
E.A. Pavlyuk, mazahaka40@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-8948-5830

[1] *Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Makovsky St., 142, Vladivostok, Primorsky Krai, 690024, Russian Federation*
[2] *Hageri Antar LLC, Adonts Ave., 6/1, Yerevan, 0001, Armenia*

Abstract

The collection of woody plants of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Q. robur was not represented. There have been no previous successful attempts to introduce this species in the Far East. Therefore, we have started a study on the possibility of introducing *Q. robur* in Primorsky Krai. Acorns for sowing were collected in the green areas of Yerevan, Armenia (Poplavok ark). The acorns were harvested 2 months after their mass fall on November 29, 2023. The sample size is more than 100 pieces. The oak species has been identified as *Q. robur* f. *praecox*. The sowing qualities of acorns have been studied. The mass of 1,000 acorns in our study was 8370 g. Their diameter ranged from 16 to 23 mm (on average 21 mm), height 39.4 (36-43) mm. The indicator germination of acorns was determined at different terms of storage from 60 to 90%. The germination of acorns after storage at low plus temperature increased (up to 90%), which indicates the high quality of acorns. The results of the study of the development of seedlings at the early stage of ontogenesis are presented. The root begins to grow immediately after planting, reaching 250 mm in length by 2 months (by the time of emergence of seedlings) with lateral roots 10-30 mm long each. 2.5 months after sowing, the epicotyle height average 60-70 mm. Transplanting seedlings delayed shoot growth and/or stimulated the formation of additional shoots, the second shoot formed in 30%, the third in 10% of acorns. The shoot height of one-year-old seedlings, when grown indoors, was 20.8 (11-35) cm, in those planted in open ground 15 (6-25) cm. Leaf fall in plants planted in the ground occurred in the last decade of October, with a steady decrease in the average daily air temperature to +12 °C. In indoor conditions, the leafless period lasted 20 days in January. The data were obtained over a period 1.5 years. Phenological observations were conducted from November 2023 to the present. A portion of the oak seedlings were planted in the open ground in the first year to determine the possibility of their overwintering in the region. The photographs presented in the article were taken by the authors.

Keywords: *Primorsky Krai, Botanical garden, introduction, acorns, Quercus robur* L., *pedunculate oak, sowing qualities, germination, viability, seedlings*

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Botanical Garden Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences on the topic: "Introduction to culture, study and

conservation of genetic resources of economically valuable plants of East Asia" for 2022-2026. EGISU R&D No.: 122040800086-1 (FWFR-2022- 0007).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to colleagues Dudkin R.V., Kalinkina V.A., Koldaeva M.N., Nesterova S.V., Pshennikova L.M., who advised the work during its writing; to the employee of the Yerevan Botanical Garden Paytyan Yu. for his help in determining the species of oak tree by acorns, reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Pavlyuk N.A., Pavlyuk E.A. (2025) Development of seedlings of Quercus robur L. in the early stages of ontogenesis. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 202-214 (in Russian). https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/12.

Received 01.08.2025. ***Revised*** 22.11.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Дубы выполняют рекреационную, водоохранную, водорегулирующую и почвозащитную роль вблизи от крупных населенных пунктов. Дубы высоко декоративны: архитектоника кроны и привлекательность внешнего вида *Q. robur* L. оценивается 5 баллами [1]. В коллекции древесных растений Ботанического сада-института ДВО РАН род *Quercus* L. (сем. Буковые – Fagaceae Dum.) представлен двумя аборигенными видами: дуб монгольский (*Q. mongolica* Fisch. ex Ledeb.) – наиболее распространенная широколиственная порода [2] и дуб зубчатый (*Q. dentata* Thunb.), относящийся к редким, находящимся на границе ареала [3]. Кроме них выращивается интродуцент дуб красный (*Q. rubra* L.), достигший генеративного возраста. Успешных попыток интродукции *Q. robur* на Дальнем Востоке ранее не отмечено. Поскольку основным способом размножения дуба является семенной, изучение возможности интродукции в Ботаническом саду вида *Q. robur* необходимо было начать с исследования посевных качеств жёлудей и развития проростков на ранних этапах онтогенеза, сравнивая с имеющимися данными *Q. mongolica* и *Q. dentata* [2, 4].

Дуб черешчатый, или летний – ***Q. robur*** L. Дерево до 40 м высоты. Жёлуди эллипсовидно-цилиндрические, по 1-3 на плодоносах до 6-8 см длины. [5], созревают в конце сентября - начале октября Нуждаются в стратификации при 0–5°С в течение 1-3 месяцев [6]. Распространение жёлудей происходит по типу синзохории.

Требования к условиям произрастания: *Q. robur* распространен почти по всей Европе и в некоторых областях Юго-Западной Азии. Приурочен к равнинным лесным территориям, предгорным районам (до 500 м над ур. м.), спорадически или группами по рекам, иногда поднимается до высоты 1400 м над ур. моря. Зимостойкость 7 баллов [1], хорошо переносит сильные морозы (–52 °С), и временное затопление в пойменных лесах. Не выносит промерзание верхних слоев почвы в отсутствии снежного покрова до –7 – 14 °С, в зависимости от возраста дерева [7, 8]. Северная граница распространения этой породы в европейской части России проходит через Карельский перешеек [9] Ряд исследователей [7, 10, 11, 12, 13, 14] отмечают толерантность *Q. robur* к ряду экологических факторов: высокая соле-, засухоустойчивость при интродукции за пределы ареала: в Закавказье, Северном Казахстане, Поволжье, Курганской, Омской, Новосибирской и Иркутской областях, в Средней Азии, на Алтае.

По мнению сотрудников Ереванского ботанического сада [14, 16], наилучшая всхожесть наблюдается у жёлудей собранных сразу после их опадения и колеблется от 60 до 93 %. Опавшие желуди подвергаются высыханию и потере всхожести вследствие низкой влажности воздуха и неустойчивому снежному покрову. Исследование зависимости всхожести желудей от срока их сбора на северо-западе европейской части России

показало иную тенденцию: у собранных осенью всхожесть была 65–73%, у желудей весеннего сбора 87–92 % [17]. Такая разница может объясняться наличием, глубиной и длительностью снежного покрова, под которым опавшие желуди хранятся до весны в оптимальных условиях: не пересыхая, и не испытывая резких перепадов температуры. Полевая всхожесть в лесном питомнике Воронежской области составляла 41–55 %, не зависимо от степени затенения посевов, поскольку определяющими факторами на этапе прорастания, являются внутренние факторы: "генетическая разнокачественность желудей, запас питательных веществ в семядолях и жизненное состояние желудей" [18]. Аналогичные исследования в почвенно-климатических условиях Астраханской области показали всхожесть (31) 28-36% в зависимости от длительности затопления пойменных участков, на незатопляемом участке была выше на 5% [19]. В Поволжье, при выращивании с закрытой корневой системой, на всхожесть, (72) 58,3–87,5 %, существенно влияли агрохимические свойства и органическая составляющая субстратов [20]. В Курганской области всхожесть желудей варьировала от 16 до 87% (32%) и значительно повышалась с использованием мульчирования посевов [11]. Данная работа впервые посвящена началу изучения интродукции данного вида на юге Приморского края.

Цель данной работы – изучить особенности прорастания жёлудей *Quercus robur* L. в условиях интродукции на юге Приморского края.

Задачи: определить всхожесть желудей (в %) на разных сроках хранения, сделать описание проростков и переход в ювенильное состояние, высадить однолетние сеянцы в отрытый грунт для адаптации.

Материалы и методы

Работа является эмпирическим исследованием.

Материалом для исследования послужили плоды дуба – орехи, называемые у дуба жёлудями, собранные 29 ноября 2023 г. в единой локации: г. Ереван, Армения (парк Поплавок) в количестве более 100 шт. Вид дуба определили по плодам как *Q. robur* L.; учитывая ранние сроки наступления цветения и плодоношения, как фенологическую форму или вариацию f. *praecox* [7, 14, 21]. Массовое цветение дуба в месте сбора желудей было отмечено нами 6 апреля (рис 1a). Тенденция раннего цветения сохранилась в последующие 2024-25 гг. По данным Д.В. Вартанян [14], цветение наступает при сумме эффективных температур выше +10°C (212–242°). Вид *Q. robur* относится к цветущим очень обильно [1]. Образование плодов нами было зафиксировано 31 июля (рис. 1b).

Массу 100 семян определяли путем взвешивания желудей на лабораторных весах KERN 440-33.

Доброкачественность жёлудей рассчитывали как процентное соотношение полноценных семян к загнившим, которую определяли визуально по окраске и внутренней зараженности (ГОСТ 13056.8–68). К доброкачественным относили сухие выполненные жёлуди с характерной для вида окраской перикарпа, окраска семядолей кремового цвета, допускаются небольшие единичные пятна без грибницы.

Почвосмесь для посева готовили из садовой земли, песка, вермикулита и торфа в соотношении 3:2:2:1, без стерилизации. Добавляли комплексное гранулированное удобрение в количестве 50 г/10 л почвосмеси.



Рисунок 1. Генеративное состояние *Q. robur* возраст дерева более 70 лет, парк Поплавок: a – цветение одновременно с распусканием листьев 6 апреля, красные стрелки указывают на свисающие сережки мужских цветков, b – образование зеленых желудей на плодоножке 31 июля

Figure 1. Generative state of *Q. robur*, the age of the tree is more than 70 years Poplavok Park: a – blossom the same time as the opening of the leaves, April 6, red arrows indicate hanging catkins of male flowers, b – the formation of green acorns on the peduncle on July 31

Состав удобрения: NPK 12:8:14. Содержание микроэлементов: Mg 2%, S 8%, Ca 0,6, Mn 0,2, Cu 0,1, B 0,1, Fe 0,2, Zn 0,1, Mo 0,01%.

Для посева отобрали жёлуди, в основном, со вскрытым перикарпом.

Поскольку характер роста и развития сеянцев зависят от срока посева желудей [22], посадку проводили в 3 этапа: первый – 14 декабря 2023 г. (20 штук), следующие 2 марта (20 шт.) и 14 марта (30 шт.) 2024 г. в пластиковые горшки, в помещении при комнатной температуре, которая варьировалась в дневное время от +15 до +25 °С. Желуди заглубляли в почву на 5 см; рекомендуемая глубина заделки 6 – 10 см, или по поверхности почвы с мульчированием [11, 14, 21].

Для предотвращения высыхания почву накрывали пищевой пленкой, а после появления побегов мульчировали мхом. Сеянцы до высадки в грунт были выставлены на окне южной экспозиции. Жёлуди для повторных посевов хранили в слегка влажном мхе, в холодильнике, при t° +2 – 0 ºС.

Всхожесть определяли путем учета на 30 день нормально развитых проростков. Таковыми считали желуди, развившие здоровые корешки длиной не менее длины семени (ГОСТ 13056.6–97).

Высоту надземного побега и корня измеряли у каждого из 57 сеянцев с точностью до 0,1 мм.

Результаты и обсуждение

Начало опадения зрелых желудей *Q. robur* в Ереване наблюдали 10 сентября, массовое опадение – 1 октября. Жёлуди опадают вместе с плодоножками и плюсками, но быстро подсыхая, от прикосновений жёлудь легко отделяется от плюски, плодоножка чаще остается на плюске и служит для их видовой идентификации (рис. 2 a,b). Следует отметить, что урожай желудей в месте сбора был обильным в 2023, поврежденных вредителями желудей не наблюдали. Отсутствовали желуди с видимыми пятнами плесени.

Один из показателей качества семян – масса 1000 желудей *Q. robur* в нашем исследовании составила 8370 г. Аналогичный показатель в Брянской и Курганской областях у *Q. robur* варьируется от 2862 до 3410 г. [10, 11]. Для сравнения масса 1000 желудей *Q. mongolica* в Приморском крае равняется 3900 г; *Q. dentata*: 1930±120 г [2, 4].

Ереванские желуди оказались крупнее и более чем в 2 раза тяжелее желудей этого же вида, из других регионов, по данным, приведенным в литературных источниках. Очевидно, что размер плодов зависит от условий произрастания дерева (почвенных, климатических, агротехнических). Местность, где были собраны плоды, расположена на стыке Араратской равнины и вулканического плато к северу от неё, в долине р. Раздан, и покрыта озерно-аллювиальными и пролювиальными, богатыми минералами отложениями, обуславливающими высокое плодородие почвы. Почвы здесь орошаемые бурые луговые, с высоким содержанием карбонатов и низким содержанием гумуса, РН 8,2-8,5, мощность профиля 80-120 см [23]. Среднегодовая температура воздуха в Ереване +11,4°С. Время перехода через +10°С 7 апреля. Сумма активных температур выше 10°С -



Рисунок 2. *Q. robur*: a - плюски с плодоносами, жёлуди, b - наружная поверхность плюсок покрыта короткими прижатыми жесткими чешуйками, 29.11.2023

Figure 2. *Q. robur*: a - cupules with peduncles, acorns, b - the outer surface of the cupules is covered with short pressed hard scales, 11/29/2023



Рисунок 3. Вариации жёлудей *Q. robur:* эллипсовидная, цилиндрическая, широкоэллиптические, удлиненно-эллиптические, бочонковидная формы

Figure 3. Variations of acorns of *Q. robur*: ellipsoid, cylindrical, broadly elliptical, elongated elliptical barrel-shaped

4040°С. Небольшая сумма осадков, 316 мм в год, дополняется своевременным поливом, осуществляемым с помощью специального трубопровода, проложенного в городских парках по поверхности почвы. Деревья *Q. robur* в парке подвергаются тщательному уходу: формирующая обрезка, уборка опавшей листвы и веток, что уменьшает инфекционный фон. Поражения листьев дуба мучнистой росой не отмечено. Перечисленное

в совокупности повлияло на формирование крупных, тяжелых желудей.

Для жёдлудей отмечена размерная поливариантность (рис. 3). Их диаметр варьировал от 16 до 23 мм (в среднем 21 мм), высота 39.4 (36–43) мм. Ранее исследователи также обращали внимание на значительную вариабельность жёлудей *Q. robur* по форме и размеру и связывают фенотипическую изменчивость с генетическим разнообразием в популяциях дуба [24].

Проросшие жёлуди *Q. robur* во время сбора отсутствовали, что отличает их от дуба монгольского, у которого, обычно, жёлуди опадают с дуба уже с ростками [4]. В период хранения в течение 3-х месяцев во влажном мхе при температуре 0°- +2° С, лишь 1 из 30 жёлудей образовал росток.

При проращивании первой партии жёлуде недоброкачественных (мокрые, почерневшие, загнившие, невсхожие, оказалось) 40%; во второй (20 шт.) и третьей (30 шт.) партиях – до 10%.

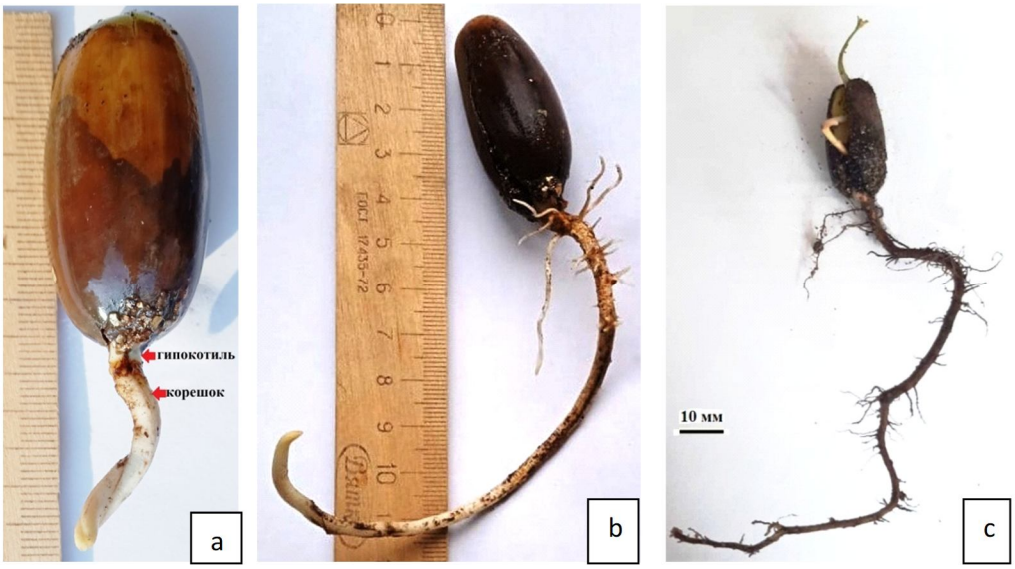


Рисунок 4. Проростки желудей *Q. robur*: a - гипокотиль и корешок 15.01.2024, b - удлинился главный и появились боковые корешки 31.01.2024, c - корень и побеги, 6.03.2024

Figure 4. Acorn seedlings of *Q. robur*: a. - hypocotyl and root on 01/15/2024, b - the main root lengthened and the lateral roots appeared on 01/31/2024, c - root and shoots, 03/6/2024



Рисунок 5. Ювенильные растения *Q. robur*: a – всходы 26,02.24, b – сеянцы, красной стрелкой указаны три побега одного жёлудя 11.03.24, c – после пикировки 17.03.24, d – второй год 28.03.2025

Figure 5. Juvenile plants of *Q. robur*: a – shoots 26.02.24, b – seedlings, the red arrow indicates three shoots of one acorn 11.03.24, c – after plant out 17.03.24, d – the second year 28.03.2025

Анализ результатов показал, что желуди с нарушенной целостностью перикарпа после опадения и длительного, в течение почти 2-х месяцев, до момента их сбора, контакта с почвой, пересыхания и заселения почвенными микроорганизмами, значительно потеряли всхожесть в сравнении с невскрытыми. После посадки жёлуди прорастали без периода покоя, что по мнению Ю.Л. Меницкого [7] характерно для подрода *Quercus*. Зародышевый корешок пробивает перикарп на верхушке желудя и углубляется в почву. Затем перикарп вскрывается продольными щелями. У жёлудей, посаженных с ненарушенным перикарпом, растрескивание перикарпа произошло только через нескольких дней после их посадки.

Отмечен активный рост гипокотиля и главного корня: через месяц после посадки их длинна в сумме составила 15 мм (рис. 4a); через 1.5 месяца - 10–120 мм (рис. 4b). К двум месяцам главный корень достигал до 250 мм длины, в этот же период наблюдается его активное ветвление и формирование на гипокотиле придаточных корней, длина которых достигает 10-30 мм (рис. 4c). Прорастание подземное, семядоли не выносятся на поверхность почвы, остаются внутри перикарпа, желудь, выталкиваемый растущим корешком, чуть приподнимаясь, оставался в почве. Быстрый рост главного корня и формирование боковых корней в ювенильном возрастном состоянии, опережающие рост побега *Q.robur,* обусловлен биологическими особенностями древесных растений, которые позволяют достичь влажных горизонтов почвы для обеспечения влагой надземной части.

Всходы появились спустя 60 дней от посева. Через 2,5 месяца от посева, 26 февраля, длина эпикотиля в среднем составила 60–70 мм. Побег имел 3 чешуевидных листа, 1–2 пары сближенных развитых настоящих листьев и верхушечную почку (рис. 5a). Первые развитые листья коротко-обратнояйцевидные с клиновидным основанием без ушек, с короткими, менее 1/3 ширины полу-пластинки листа, лопастями (рис 5b). Последующие листья яйцевидные, с хорошо выраженными лопастями (рис. 5c). Пластинки при появлении мелко-волосистые, затем оголяющиеся. К середине июля листья приобрели, отличающуюся от дуба монгольского, сизую окраску, плотную кожистую фактуру (рис. 5d).

Следует отметить, что извлечение сеянцев из почвы для измерений, пикировки и пересадки задерживали рост побега и/или стимулировали образование боковых побегов (рис. 4c, 5b) из пазушных почек в основании гипокотиля. Так около 30 % желудей после пикировки образовали второй, 10% – третий побег.

Высота побега одногодичных сеянцев, при выращивании в помещении составила 20.8 (11–35) см, у высаженных в открытый грунт 15 (6–25) см. Для сравнения, высота одногодичных сеянцев, при посеве и выращивании в грунте в Ереванском ботаническом саду достигала в среднем 10 см.

Две трети от общего количества выращенных сеянцев были высажены в открытом грунте, в пригороде Владивостока, и в центральной части о. Сахалин, где ведутся дальнейшие наблюдения за саженцами, треть растений оставлена в комнатных условиях.

Листопад у высаженных в грунт растений наступил в последней декаде октября, при устойчивом понижении среднесуточной температуры воздуха до +12°C. Понижение температуры в октябре на юге Приморского края происходило скачкообразно с амплитудой до 20° (рис. 6). Сбрасывание листвы произошло после неоднократного кратковременного понижения температуры воздуха ниже +12°C. Безлистный период в комнатных условиях длился в течение 20 дней в январе, когда температура воздуха днем была ниже +15°C, а в ночное время в отсутствии солнечного тепла опускалась ниже.

Таким образом, нижний порог развития *Q. robur* в нашем исследовании совпал с ранее установленным температурным порогом +12°C в

интродукционном исследовании вологодских ученых [25].

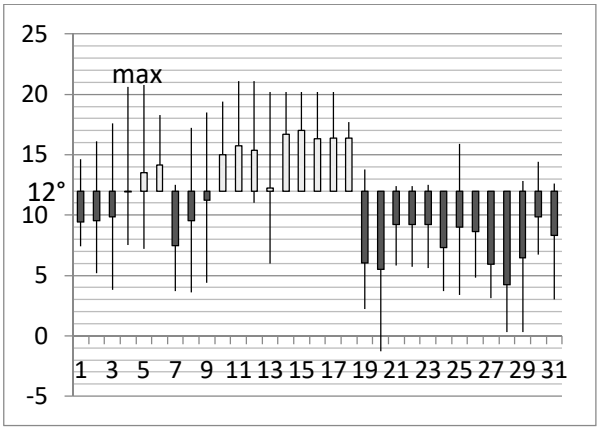


Рисунок 6. Среднесуточная температура воздуха в октябре 2024, указаны min и max показатели t °C в сутках

Figure 6. The average daily air temperature, October 2024, the min and max values of t °C per day are indicated

Источник: данные автоматической метеорологической станции, расположенной на территории БСИ ДВО РАН (N 43.22400262992436 E 131.99159176043548

Климатические условия региона могут повлиять на приживаемость в грунте и развитие интродуцента. Такой фактор как холодная, сильно ветреная бесснежная зима, характерная для юга Приморского края, может стать лимитирующим фактором вследствие зимнего иссушения саженцев. Обилие осадков в летний период потенциально может стимулировать рост дуба черешчатого. Учитывая эти особенности климата следует провести дальнейшие наблюдения за саженцами *Q. robur* во всех местах их высадки.

Выводы:

Высокая всхожесть (от 60 до 90%) свидетельствует о высоком качестве желудей, собранных в городских посадках г. Еревана. При хранении желудей при t° +2–0°C в течение 3 месяцев всхожесть не снизилась.

Наличие невсхожих жёлудей (в среднем, 18%) связано с длительным нахождением опавших плодов на поверхности почвы, пересыханием и заселением почвенными микроорганизмами.

Рост корня в первый год в 1,5 – 2 раза превосходит рост побега, достигая 20-25 см, что следует учитывать при выборе глубоких емкостей для посадки желудей.

Полученные данные по всхожести и росту сеянцев в первый год являются основой для дальнейшей разработки технологии выращивания посадочного материала *Q. robur* для озеленения на юге Приморского края.

Список литературы

1. Варданян Ж.А. Методологические аспекты оценки декоративности древесных растений // Доклады НАН Армении. Ботаника. – 2017. – Т. 117, № 4. – С. 340–349. – URL: https://arar.sci.am/Content/46827/file_0.pdf.
2. Воронкова Н.М., Холина А.Б., Журавлев В.Н., Сундукова Е.В. Размножение растений российского Дальнего Востока: монография. – Владивосток: ФНЦ Биоразнообразие ДВО РАН, 2023. – 235 с. – DOI: http://doi.org/10.25221/seeds.
3. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации [и др.]. – 2-е офиц. изд. – 2024. – 944 с.
4. Орехова Т.П. Семена дальневосточных деревянистых растений (морфология, анатомия, биохимия, хранение). – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 161 с.
5. Синицын Е.М. Определитель покрытосеменных древесных растений по плодам и семенам: учебное пособие. – СПб., 2019. – 196 с.
6. Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н. Справочник по проращиванию покоящихся семян. – Л.: Наука, 1985. – 506 с.
7. Меницкий Ю.Л. Дубы Азии. – Л.: Наука, 1984. – 316 с.
8. Варданян Ж.А., Мурадян Н.Н., Григорян М.М., Гатрчян Г.М. Высокодекоративные древесные растения Ботанического сада НАН Армении для применения в различных типах озеленения г. Еревана // Биологический

журнал Армении. – 2016. – Т. 68, № 4. – С. 22-30. – URL: https://arar.sci.am/Content/238380/file_0.pdf.

9. Шишлянникова А.Б., Змитрович И.В. К выявлению естественной и антропогенной границы дуба черешчатого в окрестностях Санкт-Петербурга // Фитосанитария. Карантин растений. – 2025. – Т. 23А, № 2S. – С. 105–106. – DOI: 10.69536/FKR.2025.75.88.001.
10. Мельников И.В., Мельников Е.В., Петрак В.Ю. Перспективность интродукции представителей рода Quercus L. в условиях Брянской области для создания насаждений различного целевого назначения // Вестник Брянского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 214-218. – URL: https://elibrary.ru/contents.asp?id=33727106.
11. Козельчук Н.Я., Мочалов А.С. Опыт проращивания семян дуба черешчатого (Quercus robur L.) в условиях Южного Зауралья с применением различных вариантов посева желудей и мульчирования // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 4 (9). – С. 23–26. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27669507_13078591.pdf.
12. Смышляева М.И. Выращивание сеянцев дуба черешчатого (Quercus robur L.) с закрытой корневой системой для создания лесных культур в зоне хвойно-широколиственных лесов среднего Поволжья: дисс. … канд. с.-х. наук: 06.03.01. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2018. – 139 с. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54458885.
13. Маленко А.А., Ширяева Е.С. К вопросу выращивания дуба черешчатого (Quercus robur L.) в сухой степи (Алтайский край) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 8 (106). – С. 54–58. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20194023.
14. Вартанян Д.В. Биологические особенности представителей рода Quercus L., интродуцированных в Армению: автореф. дисс. … канд. биол. наук: 03.00.05. – Ереван: Ботанический сад Института ботаники АН Арм.ССР, 1987. – 22 с.
15. Рунова Е.М., Аношкина Л.В., Коломина А.В. Оценка состояния некоторых видов рода Quercus в условиях Иркутской области // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 3. – С. 27-33. – DOI: https://doi.org/10.17513/use.37342.
16. Варданян Ж.А., Гатрчян М.М., Григорян М.М., Пайтян Ю.Е. Декоративные деревья и кустарники для озеленения. – Ереван, 2015. – 362 с.
17. Бурцев Д.С. Исследование роста сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой в условиях таежной зоны северо-запада европейской части России // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2014. – № 4. – С. 40–48. – URL: https://journal.spb-niilh.ru/pdf/4-2014/spbniilh-proceedings-4-2014-3.pdf.
18. Корчагин О.М., Заплетин В.Ю. Всхожесть желудей, абсолютная сохранность сеянцев и жизненное состояние прегенеративных особей дуба черешчатого в зависимости от светового режима // Лесной журнал. – 2010. – № 6. – С. 17–22. – URL: https://lesnoizhurnal.ru/article_index_years.php?ELEMENT_ID=31483.
19. Баканева А.А. Исследование всхожести жёлудей и роста однолетних сеянцев дуба черешчатого в почвенно-климатических условиях Волго-Ахтубинской поймы Астраханской области // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2022. – Т. 17, № 3. – С. 350–359. – DOI: 10.22363/2312-797X2022-17-3-350-359.
20. Романов Е.М., Смышляева М.И., Краснов В.Г., Мухортов Д.И. Выращивание однолетних сеянцев дуба черешчатого (Quercus robur L.) с закрытой корневой системой на различных питательных субстратах // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2017. – № 3 (35). – С. 26–36. – DOI: 10.15350/2306-2827.2017.3.26.
21. Любимов В.Б., Вишневская А.А., Мельников И.В., Ломадзе Р.Н. Перспективность использования представителей рода Quercus L. при создании насаждений различного целевого назначения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия: Экология. – 2008. – № 2 (13). – С. 258–263. – URL: http://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnost-ispolzovaniya-predstaviteley-roda-quercus-l-pri-sozdanii-nasazhdeniy-razlichnogo-tselevogo-naznacheniya.

22. Автономов А.Н. Влияние сроков посева желудей дуба черешчатого (Quercus robur L.) на биометрические показатели сеянцев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Биологические науки. – 2014. – № 4 (84). – С. 52-56. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-srokov-poseva-zheludey-duba-chereshchatogo-quercus-robur-l-na-biometricheskie-pokazat.
23. Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием в Армении. – Ереван: Министерство охраны природы Республики Армения, 2002. – 193 с. – URL: https://www.unccd.int/ActionProgrammes/armenia-rus2002.pdf.
24. Krutovsky K.V., Popova A., Yakovlev I.A., Yanbaev Y.A., Matveev S.M. Response of Pedunculate Oak (Quercus robur L.) to Adverse Environmental and Weather Conditions in Genetic and Dendrochronological Studies // Plants. – 2025. – Vol. 14. – P. 109. – DOI: 10.20944/preprints202411.1288.v1.
25. Карбасников А.А., Карбасникова Е.Б., Залывская О.С., Мелехов В.И. Опыт ступенчатой интродукции дуба черешчатого (Quercus robur L.) в условиях северных широт // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2025. – № 3. – С. 204–214. – DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-204-214.

✉

References

1. Vardanyan Zh. A. Metodologicheskie aspekty otsenki dekorativnosti drevesnykh rasteniy [Methodological aspects of the assessment of decorative quality of woody plants]. Doklady NAN Armenii. Botanika = Proceedings of the National Academy of Sciences of Armenia. Botany. 2017;117(4):340–349. (In Russ.). URL: https://arar.sci.am/Content/46827/file_0.pdf.
2. Voronkova N. M., Kholina A. B., Zhuravlev V. N., Sundukova E. V. Razmnozhenie rasteniy rossiyskogo Dal'nego Vostoka [Reproduction of plants of the Russian Far East]. Vladivostok: FNTs Biodiversitet DVO RAN, 2023:235. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.25221/seeds.
3. Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii. Rasteniya i griby [The Red Data Book of the Russian Federation. Plants and Fungi]. Ministerstvo prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii [i dr.]; 2 ofits. izd. 2024:944. (In Russ.).
4. Orekhova T. P. Semena dal'nevostochnykh drevesinykh rasteniy (morfologiya, anatomiya, biokhimiya, khranenie) [Seeds of Far Eastern woody plants (morphology, anatomy, biochemistry, storage)]. Vladivostok: Dal'nauka, 2005:161. (In Russ.).
5. Sinitsyn E. M. Opredelitel' pokrytosemennykh drevesnykh rasteniy po plodam i semenam [Identification key of angiosperm woody plants by fruits and seeds]. Saint Petersburg, 2019:196. (In Russ.).
6. Nikolaeva M. G., Razumova M. V., Gladkova V. N. Spravochnik po prorashchivaniyu pokoyashchikhsya semyan [Handbook on dormancy breaking in seeds]. Leningrad: Nauka, 1985:506. (In Russ.).
7. Menitskiy Yu. L. Duby Azii [The Oaks of Asia]. Leningrad: Nauka, 1984:316. (In Russ.).
8. Vardanyan Zh. A., Muradyan N. N., Grigoryan M. M., Gatrchyan G. M. Visokodekorativnye drevesnye rasteniya Botanicheskogo sada NAN Armenii dlya primeneniya v razlichnykh tipakh ozeleneniya g. Erevana [Highly ornamental woody plants of the Botanical Garden of NAS of Armenia for use in various types of landscaping in Yerevan]. Biologicheskiy zhurnal Armenii = Biological Journal of Armenia. 2016;68(4):22-30. (In Russ.). URL: https://arar.sci.am/Content/238380/file_0.pdf.
9. Shishlyannikova A. B., Zmitrovich I. V. K vyyavleniyu estestvennoy i antropogennoy granitsy duba chereshchatogo v okrestnostyakh Sankt-Peterburga [On identification of the natural and anthropogenic boundary of English oak in the vicinity of Saint Petersburg]. Fitosanitariya. Karantin rasteniy = Phytosanitary. Plant Quarantine. 2025;23A(2S):105–106. (In Russ.). DOI: 10.69536/FKR.2025.75.88.001.
10. Melnikov I. V., Melnikov E. V, Petrakov V. Yu. Perspektivnost' introduktsii predstaviteley roda Quercus L. v usloviyakh Bryanskoy oblasti dlya sozdaniya nasazhdeniy razlichnogo tselevogo naznacheniya [Prospects for the introduction of representatives of the genus Quercus L. in the conditions of the Bryansk region for the creation of plantations of various purposes]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Bryansk State University. 2011;(4):214-218. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/contents.asp?id=33727106.

11. Kozel'chuk N. Ya., Mochalov A. S. Opyt prorashchivaniya semyan duba chereshchatogo (Quercus robur L.) v usloviyakh Yuzhnogo Zaural'ya s primeneniem razlichnykh variantov poseva zheludey i mul'chirovaniya [Experience in germinating seeds of English oak (Quercus robur L.) in the conditions of the Southern Trans-Urals using different options for acorn sowing and mulching]. Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki = Bulletin of the Kurgan State University. Series: Natural Sciences. 2016;9(4):23–26. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27669507_13078591.pdf.
12. Smyshlyaeva M. I. Vyrashchivanie seyantsev duba chereshchatogo (Quercus robur L.) s zakrytoy kornevoy sistemoy dlya sozdaniya lesnykh kul'tur v zone khvoyno-shirokolistvennykh lesov Srednego Povolzh'ya [Growing of English oak (Quercus robur L.) seedlings with closed root system for establishing forest plantations in the zone of coniferous-broadleaved forests of the Middle Volga region]: Diss. Cand. Sci. (Agric.). Yoshkar-Ola, 2018:139. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54458885.
13. Malenko A. A., Shiryaeva E. S. K voprosu vyrashchivaniya duba chereshchatogo (Quercus robur L.) v sukoy stepi (Altayskiy kray) [On the issue of growing English oak (Quercus robur L.) in the dry steppe (Altai Territory)]. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2013;(106):54–58. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20194023.
14. Vartanyan D. V. Biologicheskie osobennosti predstaviteley roda Quercus L., introdutsirovannykh v Armeniyu [Biological characteristics of representatives of the genus Quercus L. introduced in Armenia]: Avtoref. Diss. Cand. Sci. (Biol.). Yerevan, 1987:22. (In Russ.).
15. Runova E. M., Anoshkina L. V., Kolomina A. V. Otsenka sostoyaniya nekotorykh vidov roda Quercus v usloviyakh Irkutskoy oblasti [Assessment of the state of some Quercus species in the conditions of the Irkutsk region]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences. 2020;(3):27-33. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17513/use.37342.
16. Vardanyan Zh. A., Gatrchyan M. M., Grigoryan M. M., Paytyan Yu. E. Dekorativnye derev'ya i kustarniki dlya ozeleneniya [Ornamental trees and shrubs for landscaping]. Yerevan, 2015:362. (In Russ.).
17. Burtsev D. S. Issledovanie rosta seyantsev duba chereshchatogo s zakrytoy kornevoy sistemoy v usloviyakh taezhnoy zony severo-zapada evropeyskoy chasti Rossii [Investigation of the growth of English oak seedlings with a closed root system in the conditions of the taiga zone of the north-west of the European part of Russia]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2014;(4):40–48. (In Russ.). URL: https://journal.spb-niilh.ru/pdf/4-2014/spbniilh-proceedings-4-2014-3.pdf.
18. Korchagin O. M., Zapletin V. Yu. Vskhozhest' zheludey, absolyutnaya sokhrannost' seyantsev i zhiznennoe sostoyanie pregenerativnykh osobey duba chereshchatogo v zavisimosti ot svetovogo rezhima [Acorn germination, absolute seedling preservation and vitality state of pregenerative individuals of English oak depending on the light regime]. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2010;(6):17–22. (In Russ.). URL: https://lesnoizhurnal.ru/article_index_years.php?ELEMENT_ID=31483.
19. Bakaneva A. A. Issledovanie vskhozhesti zheludey i rosta odnoletnikh seyantsev duba chereshchatogo v pochvenno-klimaticheskikh usloviyakh Volgo-Akhtubinskoy poymy Astrakhanskoy oblasti [Investigation of acorn germination and growth of annual seedlings of English oak in the soil and climatic conditions of the Volga-Akhtuba floodplain of the Astrakhan region]. Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo = RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2022;17(3):350–359. (In Russ.). DOI: 10.22363/2312-797X2022-17-3-350-359.
20. Romanov E. M., Smyshlyaeva M. I., Krasnov V. G., Mukhortov D. I. Vyrashchivanie odnoletnikh seyantsev duba chereshchatogo (Quercus robur L.) s zakrytoy kornevoy sistemoy na razlichnykh pitatel'nykh substratakh [Growing of annual seedlings of English oak (Quercus robur L.) with closed root system on various nutrient substrates]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie =

Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2017;35(3):26–36. (In Russ.). DOI: 10.15350/2306-2827.2017.3.26.

21. Lyubimov V. B., Vishnevskaya A. A., Melnikov I. V., Lomadze R. N. Perspektivnost' ispol'zovaniya predstaviteley roda Quercus L. pri sozdanii nasazhdeniy razlichnogo tselevogo naznacheniya [Prospects for the use of representatives of the genus Quercus L. in the creation of plantations for various purposes]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 11: Estestvennye nauki = Science Journal of Volgograd State University. Natural Sciences. 2008;2(13):258–263. (In Russ.). URL: http://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnost-ispolzovaniya-predstaviteley-roda-quercus-l-pri-sozdanii-nasazhdeniy-razlichnogo-tselevogo-naznacheniya.
22. Avtonomov A. N. Vliyanie srokov poseva zheludey duba chereshchatogo (Quercus robur L.) na biometricheskie pokazateli seyantsev [Influence of the sowing time of English oak (Quercus robur L.) acorns on the biometric parameters of seedlings]. Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Biologicheskie nauki = Bulletin of the I.Y. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Biology. 2014;84(4):52-56. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-srokov-poseva-zheludey-duba-chereshchatogo-quercus-robur-l-na-biometricheskie-pokazat.
23. Natsional'naya programma deystviy po bor'be s opustynivaniem v Armenii [National Action Programme to Combat Desertification in Armenia]. Yerevan: Ministerstvo okhrany prirody Respubliki Armeniya, 2002:193. (In Russ.). URL: https://www.unccd.int/ActionProgrammes/armenia-rus2002.pdf.
24. Krutovsky K.V., Popova A., Yakovlev I.A., Yanbaev Y.A., Matveev S.M. Response of Pedunculate Oak (Quercus robur L.) to Adverse Environmental and Weather Conditions in Genetic and Dendrochronological Studies. Plants. 2025;14:109. DOI:10.20944/preprints202411.1288.v1.
25. Karbasnikov A. A., Karbasnikova E. B, Zalivskaya O. S., Melekhov V. I. Opyt stupenchatoy introduktsii duba chereshchatogo (Quercus robur L.) v usloviyakh severnykh shirot [Experience of stepwise introduction of English oak (Quercus robur L.) in the conditions of northern latitudes]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal = Proceedings of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal. 2025;(3):204–214. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-204-214.

Сведения об авторах

✉ *Павлюк Наталья Александровна* – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории Интродукции и селекции ФГБУН Ботанический сад-институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Маковского, 142, г. Владивосток, Российская Федерация, 690024, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7556-313X, e-mail: Pavlnat67@rambler.ru.

Павлюк Евгений Андреевич – магистр, программист в компании ООО "Хагери антар", пр. Адонца, 6/1, г. Ереван, Армения, 0001, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8948-5830, e-mail: mazahaka40@gmail.com

Information about the authors

✉ *Natalia A. Pavlyuk* – Cand. Sci. (Biological), Researcher at the Laboratory of Introduction and Breeding Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Makovsky St., 142, Vladivostok, Primorsky Krai, 690024, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7556-313X, e-mail: Pavlnat67@rambler.ru.

Evgeny A. Pavlyuk – Master's degree, programmer at Hageri Antar LLC, Adonts Ave., 6/1, Yerevan, 0001, Armenia, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8948-5830, e-mail: mazahaka40@gmail.com.

CID: https://orcid.org/0000-0001-7556-313X, mail: Pavlnat67@rambler.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/13
УДК 630*581.1:582.632.2:582.686.2

Влияние засухи на интенсивность видимого фотосинтеза и водный режим ювенильных растений генотипов дуба черешчатого, березы повислой и березы пушистой в контролируемых условиях открытого грунта

Анна А. Попова[1]✉, logachevaaa@rambler.ru, http://orcid.org/0000-00034711-5377
Петр М. Евлаков[1], peter.evlakov@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0003-0138-2410
Валентина Т. Попова[1], bot-fiz.rast@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0003-3765-7164
Владлена С. Рыжкова[1], vladlena.r11@yandex.ru, http://orcid.org/0009-0000-9727-3088
Ирина М. Нартова[1], irinka.m2015@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0008-3629-2101
Вадим Г. Лебедев[2], vglebedev@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8891-1719
Константин А. Шестибратов[2], schestibratov.k@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1996-6433

[1] ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

[2] Филиал института биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН (ФИБХ), Проспект науки, 6, Пущино, 142290, Российская Федерация

Изучение физиологических реакций ювенильных растений на засуху имеет ключевое значение для селекции лесных древесных пород на продуктивность и устойчивость. Целью исследования была оценка влияния почвенной засухи, смоделированной с помощью дождезащитных укрытий, на параметры газообмена и водного режима у трёхлетних контейнерных растений контрастных генотипов. В исследовании использовали 4 семьи дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), 3 генотипа березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), 1 генотип березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и одну трансгенную линию березы пушистой (F14GS8b). Измеряли интенсивность видимого фотосинтеза (Рн), транспирации (Е), устьичной проводимости (gs) и рассчитывали эффективность использования воды (WUE). У всех растений засуха вызвала достоверное снижение Рн, Е и gs. Установлена сильная прямая корреляция между устьичной проводимостью и интенсивностью фотосинтеза (r = 0,8). Выявлена значительная межиндивидуальная изменчивость реакции на стресс. Среди изученных генотипов выделены потенциально устойчивые, характеризующиеся наименьшим снижением Рн в условиях засухи (например, семья дуба 233.57 и 339.57, генотип березы БП4а), а также генотипы с высокой продуктивностью в оптимальных условиях (семья дуба 63.12, генотип березы ББ4б). Растения дуба в условиях засухи достигали более высокой эффективности использования воды (до 10.4 мкмоль CO_2/моль H_2O), чем береза. **Полученные нами результаты свидетельствуют об индивидуальной генотипической реакции древесных растений на уменьшение их влагообеспеченности,** что открывает возможности для целенаправленного отбора перспективных генотипов в селекционных программах.

Ключевые слова: *интенсивность видимого фотосинтеза, интенсивность транспирации, эффективность использования воды, семьи, дуб черешчатый, береза пушистая, береза повислая, адаптивный потенциал*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-64-00036, https://rscf.ru/project/22-64-00036/.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние засухи на интенсивность видимого фотосинтеза и водный режим ювенильных растений генотипов дуба черешчатого, березы повислой и березы пушистой в контролируемых условиях открытого грунта / А. А. Попова, П. М. Евлаков, В. Т. Попова, В. С. Рыжкова, И. М. Нартова, В. Г. Лебедев, К. А. Шестибратов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15 – № 4 (60). – С. 215-233. – *Библиогр.: с. 228-232 (35 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/13.

Поступила 15.08.2025. ***Пересмотрена*** 15.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

The effect of drought on the intensity of visible photosynthesis and the water regime of juvenile plants of the genotypes of Quaking Oak, Downy Birch and Downy White Birch under controlled conditions in open ground

Anna A. Popova[1] ✉, logachevaaa@rambler.ru , http://orcid.org/0000-00034711-5377
Peter M. Evlakov[1], peter.evlakov@yandex.ru , http://orcid.org/0000-0003-0138-2410
Valentina T. Popova[1], bot-fiz.rast@yandex.ru , http://orcid.org/0000-0003-3765-7164
Vladlen S. Ryzhkova[1], vladlena.r11@yandex.ru , http://orcid.org/0009-0000-9727-3088
Irina M. Nartova[1], irinka.m2015@yandex.ru , https://orcid.org/0009-0008-3629-2101
Vadim G. Lebedev[2], vglebedev@mail.ru , https://orcid.org/0000-0002-8891-1719
Konstantin A. Shestibratov[2], schestibratov.k@yandex.ru , https://orcid.org/0000-0002-1996-6433

[1]*Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, 8 Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russian Federation*

[2]*File of the M. M. Shemyakin and Yu. A. Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290, Russian Federation*

Abstract

The study of physiological responses of juvenile plants to drought is importance for the forest tree selection for productivity and sustainability. The aim of the study was to assess the effect of soil drought, simulated by rain shelters, on the parameters of gas exchange and water regime in three-year-old container plants different genotypes. The study used 4 families of oak (*Quercus robur* L.), 4 genotypes of birch at *Betula pubescens* Ehrh. and *Betula pendula* Roth. and one transgenic line of *Betula pendula* (F14GS8b). The intensity of visible photosynthesis (Pn), transpiration (E), stomatal conductance (gs), and water use efficiency (WUE) were measured. In all plants, drought caused a significant decrease in Pn, E, and gs. A strong direct correlation was established between stomatal conductance and photosynthesis intensity (r = 0.8). Significant interindividual variability in response to stress was observed. Among the studied genotypes, there are potentially stable ones that have the lowest decrease in Pn under drought conditions (e.g., oak family 233.57 and 339.57, birch genotype BP4a), as well as genotypes with high productivity under optimal conditions (oak family 63.12, birch genotype BB4b). Under drought conditions, oak plants achieved higher water use efficiency (up to 10.4 μmol CO_2/mol H_2O) than birch plants. The results we obtained indicate the individual genotypic response of woody plants to a decrease in their moisture supply, which opens up opportunities for targeted selection of promising genotypes in breeding programs.

Keywords: *intensity of visible photosynthesis, intensity of transpiration, efficiency of water use, families, oak petiolate, birch fluffy, birch hanging, adaptive potential*

Financing: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 22-64-00036, https://rscf.ru/project/22-64-00036/.

Acknowledgements: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Popova A. A., Evlakov P. M., Popova V. T., Ryzhkova V. S., Nartova I. M., Lebedev V. G., Shestibratov K. A. (2025) The effect of drought on the intensity of visible photosynthesis and the water regime of juvenile plants of the genotypes of Quaking Oak, Downy Birch and Downy White Birch under controlled conditions in open ground. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 4 (60), pp. 215-233 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/13.

Received 15.08.2025. ***Revised*** 15.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 16.12.2025.

Введение

Климатические изменения последних десятилетий сопровождаются учащением периодов засухи, что особенно заметно в умеренной зоне России, [1] где засушливые годы чередуются с экстремально жаркими сезонами. Это ведёт к снижению прироста, усыханию насаждений и изменению видовой структуры лесов.

Одним из наиболее чувствительных физиологических процессов к дефициту влаги является фотосинтез, определяющий рост и углеродный баланс растений. Под действием засухи снижаются устьичная проводимость, скорость поглощения CO_2 и фотохимическая активность хлоропластов, что приводит к накоплению активных форм кислорода и нарушению целостности мембран [2]. Аналогичные реакции наблюдаются и у травянистых культур. В частности, у пшеницы засуха вызывала снижение содержания фотосинтетических пигментов и биомассы побегов, накопление пролина, а также повышение активности антиоксидантных ферментов — супероксиддисмутазы, каталазы и аскорбатпероксидазы, что отражает активацию защитных механизмов при водном дефиците [3]. Однако устойчивость к засухе варьирует между видами, популяциями и даже генотипами, что подчёркивает значение сравнительных исследований физиологических механизмов адаптации [4,5].

Для хвойных пород показано, что сеянцы сосны и ели способны поддерживать водный статус даже при низком водном потенциале среды за счёт развитого осмотического процесса и регуляции клеточной стенки [2]. однако для лиственных, таких как дуб и берёза, аналогичные данные о фотосинтезе и водообмене в контролируемых условиях отсутствуют, что и определяет новизну данной работы. Закрытие устьиц представляет собой основную адаптационную реакцию растений на засуху, поскольку это предотвращает чрезмерную потерю воды, снижает температуру поверхности листьев и повышает эффективность водопользования [6]. Устьичные отверстия играют важную роль не только в регуляции водного обмена, но и в контроле поступления углекислого газа [7]. При длительном и интенсивном водном стрессе уровень углекислого газа в листьях и его транспортировка уменьшаются, что приводит к снижению концентрации CO_2 в хлоропластах и угнетению фотосинтетической активности. Уменьшение CO_2 ограничивает работу ключевых ферментов, таких как сахарозофосфатсинтаза и нитратредуктаза, а также затрудняет регенерацию рибулозы бисфосфата RuBP и ингибирует Рубиско [8]. В условиях водного стресса также наблюдается повреждение тилакоидной мембраны хлоропластов, что нарушает стабильность фотосинтетических пигментов и снижает скорость фотосинтеза [9]. Современные исследования акцентируют внимание на методах оценки эффективности использования воды растениями, что позволяет интерпретировать физиологические процессы в условиях водного стресса [10,11]. Важная роль в поддержании фотосинтетической активности при водном стрессе принадлежит сигнальным молекулам, таким как абсцизовая кислота (ABA) и оксид азота (NO). NO участвует в ABA-зависимом закрытии устьиц, активации антиоксидантных ферментов и снижении фотодеструкции пигментов [12]. Эти молекулярные механизмы позволяют растениям поддерживать баланс между интенсивностью фотосинтеза и потерей воды, предотвращая развитие окислительного стресса. Таким образом, в качестве индикаторов для оценки чувствительности ювенильных растений были выбраны параметры

газообмена и транспирации листа, интенсивности фотосинтеза, эффективности использования воды.

Различия по устойчивости обнаруживаются как между отдельными видами, так и их генотипами. Представляется возможным поиск этих признаков у молодых растений, полученных в результате размножения материнских деревьев [13]. Выбор объектов исследования обусловлен их экологической и хозяйственной значимостью для лесоразведения в Центральной лесостепи. Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), берёза повислая (*Betula pendula* Roth.) и берёза пушистая (*B. pubescens* Ehrh.) — основные лесообразующие породы европейской части России, важные для лесовосстановления и защитного лесоразведения [14]. Дуб характеризуется умеренной засухоустойчивостью и высокой продуктивностью в условиях лесостепи [15], а берёзы отличаются способностью приспосабливаться к разным условиям произрастания, но остаются чувствительными к длительному дефициту влаги [16].

Селекционные исследования выявили внутривидовую изменчивость по водопотреблению и устойчивости у форм березы [17]. В сравнительных исследованиях видов рода *Quercus* показано, что дуб черешчатый сохраняет стабильное содержание воды в листьях и умеренную интенсивность транспирации при колебаниях водного режима [18], что отражает его способность поддерживать водный баланс в засушливых условиях. Эти данные подтверждают перспективность изучения физиологических механизмов засухоустойчивости дуба черешчатого для отбора устойчивых форм и создания адаптированных лесных насаждений.

Мы предполагаем, что чувствительность параметров фотосинтеза и водного режима генотипов F2 потомства ранее изучаемых материнских деревьев (семей), анализируемых в ходе исследования дуба и березы по продуктивности, будет различной. Установление особенностей изменений интенсивности фотосинтеза, транспирации и эффективности использования воды и выявление генотипов с различной чувствительностью данных физиологических параметров необходимо для селекции древесных растений с применением генетических и омикс-технологий.

Целью исследования является оценка чувствительности трехлетних растений контрастных семей дуба черешчатого и генотипов березы двух видов (б. повислая и б. пушистая) и трансгенной линии б. повислой к засухе на основе анализа параметров газообмена и водного режима в контролируемых условиях дождезащитных укрытий.

Объекты и методика исследования

В ходе исследования по оценке чувствительности растений дуба и березы к засухе эксперимент проводился на контейнерных растениях 4 генотипов дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), 4 генотипов берез: генотипы березы пушистой (*Betula pubescens Ehrh.)* и б. повислой (*Betula pendula Roth),* а также трансгенная линия б. пушистой F14GS8b. Все экспериментальные растения одновозрастные (трехлетние). В эксперименте использовали растения, выращенные в условиях открытого грунта с использованием дождезащитных укрытий в течение вегетационного периода 2024 года.

Трехлетние растения дуба были выращены из желудей, собранных в 2022 году с деревьев F1 потомства плюсовых деревьев Шипова леса. Лесосеменная плантация (расположение: Воронежская область, Семилукский лесной селекционный опытно-показательный питомник (51°42′47′ с. ш., 38°57′08′ в. д.) является научным объектом, создана в 1976 году посевом желудей, заготовленных под кронами плюсовых деревьев позднораспускающейся и промежуточной формы дуба в Шиповом лесу. Материнские деревья известного происхождения объединены в семьи, возраст материнских деревьев составляет 49 лет, расположение деревьев на плантации - 5 на 5 метров.

Ювенильные растения березы представлены потомствами деревьев *B. pendula* и *B. pubescens*, а также трансгенной линией *B. pubescens* F14GS8b, созданной в лаборатории лесной биотехнологии ФИБХ РАН. Ювенильные растения, полученные посевом семян анализируемых

популяций берез, переданы ФИБХ РАН в ВГЛТУ для проведения эксперимента в дождезащитных укрытиях весной 2024 г. Семена собраны в локальных популяциях Воронежской области, различающихся по происхождению и физиологическим характеристикам. Все растения выращивались в контейнерах, с единым субстратом и контролируемым поливом, что обеспечило единые стартовые условия перед проведением эксперимента по засухе. Саженцы дуба черешчатого выращивали в контейнерах объемом 4 л и высотой 22 см. Одновозрастные растения березы были высажены в 2-х литровые контейнеры высотой 17 см. Субстрат - торфяная смесь VELTORF (производитель – ООО «Велторф», Псковская область).

Засушливые условия для роста растений в эксперименте моделировали с использованием дождезащитных укрытий в течении 7 недель.

Климатические условия г. Воронежа в период проведения эксперимента представлены на рисунке 1. Влажность воздуха в августе варьировала от 22% (1.08) до 100 % (28.08) 31 °С, в сентябре - от 22% (17.09) до 100% (1.09). Средняя температура воздуха днем в июле составила +29°С, ночью +19°, влажность воздуха - 57%; в августе: +27° / +17°, 58%; в сентябре +25° / +14°, 41%. Регулярный полив с поддержанием определенного уровня влажности почвы проводился в двух вариантах:

1 – опыт – полив 30–40 % от полной влагоемкости субстрата;

2 – контроль – нормальный полив 70 %.

Для поддержания необходимых значений определяли влагоемкость почвы до начала эксперимента. Почву просеивали и насыпали в цилиндр диаметром 3-4 см и высотой 10-20 см (по высоте сосуда для выращивания), нижний конец обвязывали марлей, удерживающей фильтровальную бумагу.

Параллельно отбирали дополнительный образец почвы для определения влажности (высушивание при 105°С). Насыпали почву, уплотняя ее легким постукиванием, до уровня на 1-2 см ниже верхнего края. Цилиндр ставили в воду (уровень на 5-7 мм выше нижнего уровня почвы), накрывали и выдерживали до полного насыщения. Затем вынимали из воды, обсушивали снаружи и ставили на фильтровальную бумагу. Как только вода перестала стекать, цилиндр взвешивали на технических весах и на 1-2 ч помещали в кристаллизатор под колпак и вновь взвешивали. Эту операцию повторяли до постоянного веса цилиндра с почвой, поглотившей воду. Расчет полной влагоемкости проводили по следующей схеме: рассчитывали навеску воздушно-сухой почвы, взятой в цилиндр, затем рассчитывали вес абсолютно сухой почвы, определяли вес пустого цилиндра с весом абсолютно сухой почвы.



Рисунок 1 – Динамика дневных и ночных температур в г. Воронеже в период проведения эксперимента

Figure 1 – Average monthly temperature in Voronezh during the experiment

Источник:
https://www.timeanddate.com/weather/russia voronezh/historic?month=9&year=2025 Weather in сентябрь 2025 in Voronezh, Russia

По разности между весом цилиндра с почвой, насыщенной водой, и весом пустого цилиндра с весом абсолютно сухой почвы рассчитывали количество воды, удерживаемой данной навеской. Количество удерживаемой воды рассчитывали в процентах от абсолютно сухой почвы.

Общее количество растений в опыте – 151 шт. Из них: дуба черешчатого 45 шт. – контрольный вариант, 50 шт. – засуха; березы пушистой по 28 шт. контроль и опыт соответственно.

Для измерения газообмена отбирали одновозрастные, полностью сформированные, не отделенные от растения листья верхушечных побегов текущего года дуба и березы. Определение параметров устьичной проводимости, процессов транспирации и видимого фотосинтеза, температуры листа и контроль за уровнем освещения ФАР при снятии показателей проводили с помощью портативной системы измерения газообмена растений CI-340 (CID Bioscience, США).

Длительность эксперимента составила 7 недель. Фотосинтетические характеристики определяли по истечении эксперимента. Общий вид растений дуба черешчатого и березы во время исследования газообмена листа, не отделенного от растения, представлен на рисунке 2 и 3.



Рисунок 2 – Общий вид процесса исследования газообмена листа растений березы пушистой (сентябрь 2024 г.)

Figure 2 – General view of the process of studying the gas exchange of the fluffy birch leaf (September 2024)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author’s composition



Рисунок 3 – Общий вид процесса исследования газообмена листа растений дуба черешчатого (сентябрь 2024 г.)

Figure 3 – General view of the process of studying the gas exchange of the leaf of the European oak tree (September 2024)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author’s composition

Эффективность использования воды растениями (ЭИВ) оценивали делением текущих значений интенсивности фотосинтеза к интенсивности транспирации, с учетом методических рекомендаций [35,25].

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программы Stadia. Использовали стандартный пакет описательной статистики, однофакторный дисперсионный и корреляционный анализы.

Результаты

1.1 Результаты измерения интенсивности фотосинтеза и транспирации у генотипов дуба черешчатого

После 7 недель моделирования условий засухи была проведена регистрация показателей фотосинтетической и транспирационной активности у контрольной и опытной групп растений, результаты которой представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры газообмена листа и транспирации экспериментальных растений дуба черешчатого различного происхождения

Table 1

Parameters of leaf gas exchange and transpiration of experimental plants of the sweet cherry oak of different origin

Номер Семьи /Family No	Вариант Опыта/Treatment	Интенсив-ность освещения (ФАР), мкмоль/м^2/с/Light intensity (PAR), μmol/m^2/s	Температура листа, (tл), °C/Leaf temperature (tl), °C	Интенсив-ность видимого фотосинтеза (Рн), мкмоль/м^2/с/ Photosynthetic rate (Pn), μmol/m^2/s	Интенсив-ность транспирации (Е), ммоль/м^2/с/ Transpiration rate (E), mmol/m^2/s	Устьичная проводимость (С), моль/м^2/с/ Stomatal conductance (C), mol/m^2/s	Эффектив-ность использования воды (ЭИВ), Ммоль CO_2 / моль H_2O/Water use efficiency (WUE), mmol CO_2/mol H_2O
339.57	засуха/ drought	1594±222	27.0±0.71 *	13.6±1.32	1.4±0.25**	68±20	10.4±0.91*
	контроль/ control	1434±142	28.4±0.23	14.8±0.54	2.0±0.12	86±7	7.6±0.67
63.12	засуха/ drought	1275±329	31.4±0.15 *	13.9±0.35**	2.3±0.45**	76±19***	6.4±1.42
	контроль/ control	1337±19	29.5±0.34	21.2±3.19	3.6±0.32	177±19	5.8±0.4
233.57	засуха/ drought	1639±179	29.4±0.2*	16.8±0.19*	2.5±0.15**	101±7**	6.9±0.35**
	контроль	1133±182	28.4±0.11	18.2±0.38	3.2±0.1	170±6	5.6±0.11
151.1	засуха/ drought	1354±47	30.8±0.72	9.3±1.71**	2.0±0.27**	70±15**	4.8±0.82
	контроль/ control	1785±124	30.8±0.7	14.9±1.16	3.1±0.61	131±37	5.0±0.86
Средние значения/ Mean values	засуха/ drought	1465±194	29.6±0.45	13.4±0.89*	2.0±0.28*	79±15*	7.1±0.88
	контроль/ control	1422 ±117	29.3±0.35	17.3±1.32	3.0±0.29	141±17	6.0±0.51

Обозначение: * - различие с контролем достоверны ($p \leq 0.05$); ** - различие с контролем достоверны ($p \leq 0.01$); *** - различие с контролем достоверны ($p \leq 0.001$)

Источник: собственные вычисления автора Source: own calculations

Интенсивность фотосинтеза является одним из главных показателей активности темновой фазы фотосинтеза. Его значения свидетельствуют, с какой активностью поглощаются из воздуха молекулы углекислоты единицей листовой поверхности в единицу времени.

По средним показателям всех генотипов дуба черешчатого засуха вызвала снижение интенсивности видимого фотоинтеза на 22,5 %. Среди изучаемых семей дуба черешчатого выявлена семья, снижение интенсивности фотосинтеза у растения которой после 7 недельной засухи не было столь выражено – это семья 339.57 (интенсивность фотосинтеза снизилась на 8,1 %). Сопоставимые со средним снижением показателями зафиксированы для семьи 233.57 (- 8,1 %). Семьи 63.12 и 151.1 показали выраженное снижение интенсивности видимого фотосинтеза (- 34,4 % и 37,6 %, соответственно).

Для условий засухи у изученных 3-х летних растений дуба черешчатого, испытывающих засуху, максимальная интенсивность фотосинтеза листьев варьировала от 9.3 до 16.8 мкмоль/м^2/с. Наибольшая величина отмечалась у растений, принадлежащих к

семье 233.57 (16.8±0.19 мкмоль/м^2/с), а наименьшая – у растений семьи 151.1 (9.3±1.71 мкмоль/м^2/с).

У растений дуба в варианте опыта без засухи максимальный уровень фотосинтетической активности листьев изменялся от 14.8 до 21.2 мкмоль/м^2/с. Самые высокие показатели фотосинтетической активности имела семья 63.12 (21.2±3.19 мкмоль/м^2/с), самые низкие – семья 339.57 (14.8±0.54 мкмоль/м^2/с).

Уровень максимальной фотосинтетической продуктивности у изучаемых семей неодинаков, при это строгой закономерности между величиной максимальной интенсивности фотосинтеза и снижении при воздействии засухи не выявлено. Так, снижение фотосинтеза выше среднего зафиксировано как у семьи с максимальным уровнем фотосинтеза в условиях контроля 63.12, так и с семьи с минимальными значения – 151.1. Активность фотосинтетической системы древесных имеет ярко выраженную зависимость и от транспирации листьев. Транспирация является важным и необходимым физиологическим процессом, обеспечивающим приспособление растений к различным условиям произрастания – защищает надземные органы от перегрева и обезвоживания в сухую и жаркую погоду, способствуя передвижению поглощённых корнями минеральных веществ из почвы вверх по растению и, как следствие, активному протеканию фотосинтеза [19, 20, 21]. Особенности ее проявления имеют значение в адаптации фотосинтетического и продукционного процессов растений с целью определения эффективных путей регулирования.

Величина интенсивности транспирации листьев у растений дуба в условиях засухи варьировала от 1.4 до 2.5 ммоль H_2O/м^2/с (при средних значениях 2.0±0.28 H_2O/м^2/с), у растений в оптимальных условиях – от 2.0 до 3.6 ммоль H_2O/м^2/с (при средних значениях 3.0±0.28 H_2O/м^2/с). Для всех семей с уменьшением влажности почвы уровень транспирации снижается.

У растений дуба, испытывающих засуху, наибольшее значение интенсивности транспирации (2.5±0.15 ммоль/м^2/с), как и ассимиляции CO_2, зарегистрировано у семьи 233.57, а наименьшее – у семьи 339.57 (1.4±0.25 ммоль/м^2/с). У контрольных растений наибольшее значение интенсивности транспирации было зарегистрировано у растений семьи 63.12 и составляло 3.6±0.32 ммоль/м^2/с, наименьшее – у растений семьи 339.57 (2.0±0.12 ммоль/м^2/с). Снижение интенсивности транспирации в среднем у растений дуба черешчатого в условиях засухи составило 33,3 %. Согласно полученным экспериментальным данным, опытные растения разных семей существенно различаются не только по интенсивности фотосинтеза, но и способностью испарять воду. Наименьший процент снижения интенсивности транспирации составил 20,9 % (семья 339.57). Максимальное падение испарения зафиксировано для семьи 63.12 (на 57,1 %).

Устьичная проводимость листьев является важным механизмом регулирования и обеспечения эффективности процессов фотосинтеза и транспирации [22, 23], и в следствие этого существенно может влиять на интенсивность роста растений и продуктивность.

В варианте с засухой устьичная проводимость менялась от 68 до 101 моль/м^2/с, в контроле – от 86 до 177 моль/м^2/с. Среди растений, подвергавшихся засухе, максимальное значение устьичной проводимости было отмечено у семьи 233.57 значение интенсивности фотосинтеза которой было максимально, минимальное – у семьи 339.57. Среди контрольных растений самые высокие показатели интенсивности транспирации были зафиксированы у представителей семьи 63.12, самые низкие – у представителей семьи 339.57. Обнаруженные варианты соотношения интенсивности фотосинтеза дополняют данные об эффективности использования воды.

Значения ЭИВ у исследуемых растений дуба, подвергавшихся засухе, изменялись в диапазоне от 4.8 до 10.4 Ммоль CO_2 / моль H_2O, что в среднем в 1,2 раза выше, чем у контрольных растений – 5.0–7.6 Ммоль CO_2 / моль H_2O**.** У семьи 339.57 с наименьшими потерями как интенсивности фотосинтеза, так и интенсивности транспирации в условиях засухи зафиксирована максимальные значения показателя ЭИВ как в засухе, так и в контроле, превышающие средние показатели по семьям. Растения этой семьи не обладают

максимальной продуктивностью в контроле, однако не показывают выраженного стресса, то есть могут обладать потенциальной устойчивостью к данному фактору.

Рассчитанное значение ЭИВ для растений семьи с высоким потенциалом продуктивности в контроле (63.12) показывают значения ниже средних (5.8 ±0.40 в контроле; 6.4 ± 1.42). Схожие значения зафиксированы для растений семьи 233.57 с высоким потенциалом продуктивности в контроле, но с низким падением интенсивности фотосинтеза в условиях засухи (5.6 ±0.11 в контроле; 6.9 ± 0.35).

Эффективность использования воды у растений дуба, особенно в условиях засухи, у растений при отсутствии снижения интенсивности транспирации представляет собой важный аспект адаптации этих генотипов к изменяющимся климатическим условиям. Однако эти механизмы имеют свои ограничения, и долговременное воздействие засухи при резком подавлении транспирации (например, как у семьи 339.57) может в конечном итоге привести к снижению их продуктивности, ограничению роста.

Таким образом, воздействие засухи на ювенильном этапе онтогенеза дуба черешчатого вызывает снижение интенсивности фотосинтеза, транспирации и устьичной проводимости. Разброс минимальных и максимальных значений говорит о наличии изменчивости и индивидуальной реакции особей изученных семей и возможности проведения отбора на устойчивость к засухе с одной стороны, с другой стороны проводить отбор генотипов с максимальной продуктивностью в оптимальных условиях.

Так, семьи 63.12 и 233.57 в условиях контроля, не подвергавшегося засухе, демонстрируют максимальные показатели фотосинтетической активности, что указывает на их высокую потенциальную продуктивность фотосинтеза. В отличие от них, семья 151.1 показывает значения ниже средних, свидетельствуя о низком уровне фотосинтетического потенциала.

Некоторые семьи проявляют относительную устойчивость к стрессу, характеризуясь меньшим снижением фотосинтетической активности - семья 233.57. Высокие темпы ассимиляции углекислого газа даже в условиях стресса могут быть связаны с генетическими особенностями и адаптивными реакциями, такими как оптимизация устьичной проводимости и накопление осмолитов. Семья 339.57 также демонстрирует низкую степень снижения интенсивности фотосинтеза в условиях засухи (8,1%,) и самую высокую эффективность использования транспирационной воды. Эти результаты подтверждают полученные в 2023 году в ходе измерения фотосинтетической активности у 2-х летних растений дуба данные о преимуществах рассматриваемых семей [24].

В ходе анализа выявлены семейства растений, демонстрирующие значительное снижение устьичной проводимости и фотосинтетической активности в условиях стресса (63.12 и 151.1). Такая физиологическая реакция на дефицит влаги может рассматриваться как адаптационное преимущество, позволяющее растениям более эффективно управлять потерей влаги. Однако следует отметить, что такая стратегия адаптации сопряжена с сопутствующим снижением продуктивности, обусловленным уменьшением ассимиляционной активности листового аппарата. Таким образом, данные результаты подчеркивают двусторонний характер текущих физиологических реакций, в которых компромисс между водоудержанием и фотосинтетической продуктивностью становится особенно актуальным в контексте изменения климатических условий.

1.2 Результаты измерения интенсивности фотосинтеза и транспирации у генотипов березы

Берёза, относящаяся к категории устойчивых и высокопродуктивных древесных растений, выделяется ускоренными темпами роста и высокой интенсивностью фотосинтетических процессов. Она обладает активной устьичной проводимостью и эффективностью использования транспирационной влаги, что оптимизирует фотосинтетические процессы. Листья березы отличаются "экономичным" функционированием: на их построение расходуется меньшее количество веществ из запасов, при этом в благоприятные годы они экспортируют ассимилятов почти в 70 раз больше, чем в неблагоприятные условия. Это можно

объяснить тем, что береза образует в пять раз больше ассимилятов на единицу площади листа, что делает ее менее зависимой от запасов ассимилятов по сравнению с другими породами [25].

Полученные данные об интенсивности видимого фотосинтеза и транспирации у опытных и контрольных растений после 7 недельного эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры газообмена листа и транспирации экспериментальных растений березы различного происхождения

Table2

Parameters of leaf gas exchange and transpiration of experimental birch plants of different origins

Номер Семьи /Family No	Вариант Опыта/Treatment	Интенсив-ность освещения (ФАР), мкмоль/м^2/с/Light intensity (PAR), µmol/m^2/s	Темпера-тура листа, (tл), °C/Leaf temperature (t), °C	Интенсив-ность видимого фотосинтеза (Рн), мкмоль/м^2/с/ Photosynthetic rate (Pn), µmol/m^2/s	Интенсив-ность транспирации (Е), ммоль/м^2/с/ Transpiration rate (E), mmol/m^2/s	Устьичная проводимость (С), моль/м^2/с/ Stomatal conductance (C), mol/m^2/s	Эффектив-ность использования воды (ЭИВ), Ммоль CO_2 / моль H_2O/Water use efficiency (WUE), mmol CO_2/mol H_2O
БП3F1	засуха/ drought	1571±66	29.7±0.38**	11.3±0.97***	2.0±0.19**	72±7.8	5.8±0.17
	контроль/ control	1606±136	31.4±0.59	15.2±0.83	2.7±0.21	92±12.1	5.8±0.5
F14GS8b	засуха/ drought	1475 ±71	31.9±0.22*	9.2±1.25***	1.9±0.32***	58±12.4***	4.9±0.19
	контроль/ control	1036±184	29.2±0.89	16.5±1.43	3.5±0.22	182±27.6	4.8±0.59
БП4а	засуха/ drought	1629±182	30.7±0.2	15.0±2.16	2.7±0.38	96±22.9**	5.6±0.47 **
	контроль/ control	1609±221	31.7±0.65	15.1±0.86	3.6±0.59	154±36.5	4.2±0.09
ББ4б	засуха/ drought	1267.07±186	30.8±0.32	17.1±1.28*	3.3±0.19*	134±14.7*	5.2±0.5
	контроль/ control	1254±146	30.2±0.15	21.0±1.42	3.9±0.19	185±15.5	5.4±0.48
Средние значения/ Mean values	засуха/ drought	1485±126	30.8±0.28	13.1±1.42*	2.7±0.32*	105±17.85	5.0±0.24*
	контроль/ control	1376±172	30.6±0.57	16.9±1.14	3.2±0.25	139±19.54	5.4±0.51

Обозначение: * - различие с контролем достоверны ($p \leq 0.05$); ** - различие с контролем достоверны ($p \leq 0.01$); *** - различие с контролем достоверны ($p \leq 0.001$)

Источник: собственные вычисления автора Source: own calculations

Так как условия и продолжительность эксперимента, возраст исследуемых растений генотипов дуба и березы, а также сроки фиксации фотосинтетической активности и водного режима растений были одинаковые было проведено сравнение изучаемых показателей. Выявлено, что ювенильные растения обладают сопоставимым уровнем фотосинтетической и транспирационной активности в контролируемых условиях выращивания (средние значения представлены в

таблицах 1,2). Различия заключаются в расчётном значении ЭИВ, которое у растений дуба черешчатого выше.

У растений берёзы, испытывающих засуху, максимальная интенсивность видимого фотосинтеза варьировала от 9.2 до 17.1 мкмоль/м^2/с. Самый высокий показатель был зафиксирован у генотипа берёзы повислой ББ4б (17.1±1.28 мкмоль/м^2/с), самый низкий – у трансгенного генотипа берёзы пушистой F14GS8b (9.2±1.25 мкмоль/м^2/с).

У контрольных растений березы в варианте без засухи максимальный уровень фотосинтетической активности листьев изменялся от 15.1 до 21.0 мкмоль/м^2/с (при средних значениях 16,9±1.14 мкмоль/м^2/с). Наибольшая величина отмечалась у растений генотипа ББ4б (21.0±1.42 мкмоль/м^2/с), наименьшая – у растений берёзы пушистой генотипа БП4а (15.1±0.86). Снижение ассимиляционной активности после 7 недельной засухи среди всех изучаемых генотипов березы составило 22,5 %.

Листья берёзы, согласно имеющимся исследованиям, демонстрируют менее активные процессы фотосинтеза, дыхания и транспирации в условиях водного дефицита [26]. Это, вероятно, связано с тем, что вклад текущего фотосинтеза в рост листьев березы значительно выше, чем у дуба [25].

В условиях контроля, не подвергавшегося засухе, высокие показатели фотосинтеза были зафиксированы у генотипа берёзы повислой ББ4б и трансгенного генотипа берёзы пушистой F14GS8b. Значения ниже средних имели генотипы берёзы пушистой БП3F1 и БП4а.

В условиях стресса наименьшее снижение фотосинтетической активности продемонстрировал генотип БП4а (- 1%), однако сохранить активное поглощение углекислого газа примерно на том же уровне удалось растениям генотипа ББ4б, интенсивность фотосинтеза у которых снизилась в условиях засухи на 18,6%. Среднее снижение составило 22.5 %.

Значения интенсивности транспирации листьев у растений берёзы в условиях засухи изменялись от 1.9 (генотип F14GS8b) до 3.6 H_2O/м^2/с (генотип БП4а). У растений берёзы в оптимальных условиях (контроль) наибольшее значение интенсивности транспирации было зарегистрировано у растений генотипа ББ4б (3.9±0.19 ммоль/м^2/с), наименьшее – у растений берёзы пушистой генотипа БП3F1 (2.7±0.21 ммоль/м^2/с).

Потерю воды растениями на транспирацию предлагается рассматривать как обмен ее на углерод, который необходим для роста растений. Исходя из этого, быстрорастущим растениям требуется значительно больше воды, чем содержится в самих растениях [27].

Показатели ЭИВ у исследуемых растений берёзы в среднем в условиях контроля составили5.4±0.51; в условиях засухи 5.0±0.24, подвергавшихся засухе, изменялись в диапазоне от 4.2 (генотип БП4а) до 5.8 (генотип БП3F1) Ммоль CO_2 / моль H_2O, у контрольных растений – от 4.8 (генотип F14GS8b) до 5.8 (генотип БП3F1) Ммоль CO_2 / моль H_2O.

У опытных растений в варианте с засухой устьичная проводимость менялась от 58 до 154 моль/м^2/с (при средних), у контрольных растений – от 92 до 185 моль/м^2/с. Среди растений в условиях засухи максимальное значение устьичной проводимости было отмечено у генотипа БП4а (154±36.51 моль/м^2/с), минимальное – у генотипа F14GS8b (58±12.36 моль/м^2/с). Среди контрольных растений самые высокие показатели интенсивности транспирации были зафиксированы у представителей генотипа ББ4б (185±15.5 моль/м^2/с), самые низкие – у представителей генотипа БП3F1 (92±12.13 моль/м^2/с).

Существуют исследования, где тоже отмечено то, что показатели устьичной проводимость у растений берёзы повислой выше, чем у растений берёзы пушистой [28]. Однако, данные, полученные нами в опыте с засухой, диктуют необходимость проведения дополнительных исследований.

Таким образом, воздействие засухи на ювенильном этапе онтогенеза берез, также как и у растений дуба, вызывает снижение интенсивности фотосинтеза, транспирации и устьичной проводимости. Генотипом с максимальной продуктивностью в оптимальных условиях можно

считать ББ4б. Высоким сопротивлением к засухе обладает генотип ББ4а.

Корреляционный анализ выявил сильную и прямую взаимосвязь между устьичной проводимостью и интенсивностью видимого фотосинтеза для обеих древесных пород (r_s=0.8 ± 0.12 в обоих вариантах), а также с интенсивностью транспирации (r_s=0.7 ± 0.20 в контроле).

Обнаруженные значения корреляций подтверждают данные, полученные для двухлетних растений дуба в условиях засухи [24]. В условиях засухи, происходит усиление взаимосвязи между освещенностью и температурой листьев, что напрямую связано со снижением интенсивности транспирации и невозможности регулирования температуры листьев в условиях стресса.

Обсуждение

Обнаруженные различия по анализируемым признакам среди семей дуба и березы в контролируемых условиях дождезащитных укрытий свидетельствуют о влиянии фактора «генотип» на устойчивость фотосинтетической системы ювенильных растений. Полученные результаты исследования согласуются с данными других исследований в области реакции саженцев дуба и березы на засуха разной силы и продолжительности. Общее направление таких работ показывает возможность запуска адаптивных реакций у генотипов и проведения отбора для выведения засухоустойчивых сортов.

Фотосинтетическая продуктивность и скорость роста ювенильных растений чувствительны к стрессовым факторам среды, в первую очередь к нарушениям водного обмена, что отмечается для различных групп растений [29]. Нарушения, связанные с засухой, проявляются в ухудшении оттока ассимилятов из-за сгущения цитоплазмы, а также снижения ростовых процессов. Повышение концентрации ассимилятов приводит к ингибированию реакций фотосинтеза и интенсификации клеточного дыхания [30]. Уровень свободной воды определяет активность фотосинтеза. Отмечается, что при высокой интенсивности транспирации уровень свободной воды снижается и может приводить к снижению интенсивности фотосинтеза [31].

Общая реакция саженцев на продолжительную засуха видов и сортов *Quercus robur*, *Quercus petraea* и *Quercus pubescens* проявляется в снижение роста побегов в высоту и диаметр стебля, при этом потепление воздуха без засухи стимулирует рост побегов в высоту, но снижает рост в диаметре стебля и длину корня, что приводит к изменению аллометрического соотношения роста. Реакция побегов и стеблей на засуху сильно варьировала в зависимости от происхождения, северные происхождения более чувствительны к засухе. [32].

Сеянцы дуба (*Quercus petraea*) в ответ на продолжительную засуху увеличивают резистентность устьиц, способны к восстановлению устьичной проводимости после продолжительной засухи и восстановлению полива. Несмотря на то, что восстановление устьичной проводимости после прекращения воздействия засухи проходит быстрее у меньших по размеру особей, особи более крупных размеров способны более активно наращивать биомассу в после стрессовый период. В целом засуха подавляет верхушечный рост и снижает количество дополнительных побегов, что в дальнейшем будет влиять на габитус растений в условиях дефицита влаги [33].

Взрослые деревья береза повислой (*Betula pendula Roth.*), березы пушистой (*Betula pubescens*) обладает высокой приспособляемостью, засухоустойчивостью и холодостойкостью, но засуха легко поражается на стадии рассады и приводит к гибели, поэтому во многих засушливых и полузасушливых районах береза не интродуцирована и практически не применяется. Продолжительность стресса засухи оказывает значимое влияние на ростовые характеристики саженцев, приводит к увеличению активности антиоксидантных ферментов, концентрация осморегулирующих веществ и перекисного окисление липидов мембран. Усиление засухи и ее продолжительность приводит к снижению фотосинтетических параметров и концентрации пигментов, вплоть до изменения анатомических структур листа при продолжительном многолетнем стрессе [34, 8].

Рассмотренные примеры изменения метаболизма у дуба и березы в ответ на засуху, и как следствие снижение роста и продуктивности

ювенильных растений показывают необходимость комплексного подхода к селекции на засуху древесных пород с целью выявления механизмов адаптаций и лучших происхождений (генотипов, семей). Выявленные пределы варьирования показателей фотосинтеза и водного режима могут стать основой для выявления особей с выдающимся потенциалом засухоустойчивости с одной стороны, либо максимальной продуктивности в оптимальных условиях выращивания с другой стороны.

Таким образом, рассматриваемые физиологические особенности можно использовать в качестве основы целенаправленного селекционного отбора и разработки перспективных морфогенотипов лесообразующих пород на продуктивность и адаптивный потенциал. Это, в свою очередь, может значительно способствовать повышению экологической устойчивости в ареале обитания и производства, а также снижению уровня углекислого газа в атмосфере за счет отбора генотипов с высокой CO_2 поглощающей способностью.

Заключение

Для трехлетних растений изучаемых генотипов дуба черешчатого и березы повислой и пушистой, включая трансгенную линию, показана изменчивость реакций на дефицит влаги.

Общая физиологическая реакция листьев дуба и березы на продолжительный стресс, вызванный 7-недельной засухой, проявляется в снижении устьичной проводимости, интенсивности транспирации и интенсивности фотосинтеза.

Значение показателей в одинаковых условиях контролируемого эксперимента у одновозрастных контейнерных растений дуба и березы сопоставимы. Для показателя интенсивности видимого фотосинтеза средние значения в контроле 17 мкмоль/м^2/с; интенсивность транспирации – 3 ммоль/м2/с; устьичная проводимость 140 моль/м^2/с. Для саженцев дуба и березы взаимосвязь интенсивности транспирации с интенсивностью видимого фотосинтеза в условиях засухи возрастает до 0,7.

Выявлено отличие пород по показателю ЭИВ, растения дуба в условиях засухи показывают более высокие значения (до 10.4 Ммоль CO_2/моль H_2O).

По чувствительности изучаемых параметров фотосинтеза и водного режима среди семей можно выделить семьи, особи которых могут быть охарактеризованы как сохраняющие интенсивность фотосинтеза в условиях засухи и семьи, с выраженным его снижением.

В оптимальных условиях (контроль) выделены семьи с высокой интенсивностью фотосинтеза, а также семьи с низкими потерями интенсивности фотосинтеза и интенсивности транспирации в условиях засухи. Такие генотипы перспективны для дальнейших селекционных работ в полевых условиях по отбору устойчивых генотипов, которые в условиях стресса незначительно снижают интенсивность фотосинтеза (падение показателей менее 20%).

Такое физиологическое состояние обеспечивается активностью генов, отвечающих за антиоксидантную защиту, осмотическую регуляцию и работу устьиц, что позволяет растениям поддерживать фотосинтетическую активность при дефиците влаги.

Список литературы

1. Сергиенко В.Г., Константинов А.В. Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2016. – № 2. – С. 29–44. – EDN WDJUGJ.
2. Кузнецов В.В. Физиологические механизмы адаптации хвойных к засухе // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды: материалы Всерос. конф. с междунар. участием (Иркутск, 10–15 июля 2018 г.) / Общество физиологов растений России. – Иркутск, 2018.
3. Amoah J.N., Seo Y.W. Effect of progressive drought stress on physio-biochemical responses and gene expression patterns in wheat. 3 Biotech; 2021; 11 (10): 440. – DOI: 10.1007/s13205-021-02991-6.
4. Алиев Р.Т., Мамедова А.Д., Гусейнова Т.Н., Гаджиев Э.С. Различие в амплитуде физиологических параметров некоторых сельскохозяйственных растений при адаптации к стрессу засухи // Актуальные исследования. – 2022. – № 6 (85). – С. 6–9. – URL: https://apni.ru/article/3711-razlichie-v-amplitude-fiziologicheskikh-param
5. Гончарова Ю.К., Харитонов Е.М., Очкас Н.А., Гончаров С.В., Свинарёв С.В. Методы анализа и механизмы устойчивости к засухе (обзор) // Рисоводство. – 2020. – № 4 (49). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-analiza-i-mehanizmy-ustoychivosti-k-zasuhe-obzor (дата обращения: 12.11.2025).
6. Ashraf M., Harris P.J. Photosynthesis under stressful environments: An overview. Photosynthetica; 2013; 51 (2): 163–190.
7. Sevanto S. Phloem transport and drought. Journal of Experimental Botany; 2014; 65 (7): 1751–1759.
8. Reddy K.R., Zhao D. Interactive effects of elevated CO_2 and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton. Field Crops Research; 2005; 94 (2–3): 201–213.
9. Bertioli D.J., Cannon S.B., Froenicke L. [et al.] The genome sequences of Arachis duranensis and Arachis ipaensis, the diploid ancestors of cultivated peanut. Nature Genetics; 2016; 48 (4): 438–446.
10. Polley W.H. Implications of atmospheric and climate change for crop yield and water use efficiency. Crop Science; 2002; 42: 131–140.
11. Sun Y., Wang C., Chen H.Y.H., Ruan H. Response of plants to water stress: a meta-analysis. Frontiers in Plant Science; 2020; 11: 978. – DOI: 10.3389/fpls.2020.00978.
12. Аллагулова Ч.Р., Юлдашев Р.А., Авальбаев А.М. Участие оксида азота в регуляции развития растений и их устойчивости к дефициту влаги // Физиология растений. – 2023. – Т. 70, № 2. – С. 134–153. – DOI: 10.31857/S0015330323020015.
13. Жукова О.И. Экологическая устойчивость популяции биотипов и форм древесных видов к почвенной засухе // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. – 2014. – № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-ustoychivost-populyatsii-biotipov-i-form-drevesnyh-vidov-k-pochvennoy-zasuhe (дата обращения: 16.09.2025).
14. Дроздов С.Н., Холопцева Е.С., Сазонова Т.А. Свето-температурная характеристика сеянцев березы пушистой (Betula pubescens Betulaceae) // Известия вузов. Лесной журнал. – 2014. – № 1 (337). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sveto-temperaturnaya-harakteristika-seyantsev-berezy-pushistoy-betula-pubescens-betulaceae (дата обращения: 12.11.2025).
15. Бугаев В.А., Мусиевский А.Л., Царалунга В.В. Дубравы лесостепи. – Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2013. – 247 с. – ISBN 978-5-7994-0559-5.
16. Гродецкая Т.А., Евлаков П.М., Исаков И.Ю. Анализ экспрессии генов стрессоустойчивости в условиях воздействия засухи на растения березы в Центрально-Черноземном регионе // Лесотехнический журнал. – 2020. – № 2 (38). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ekspressii-genov-stressoustoychivosti-v-usloviyah-vozdeystviya-zasuhi-na-rasteniya-berezy-v-tsentralno-chernozemnom-regione (дата обращения: 10.11.2025).

17. Иозус А.П., Завьялов А.А. Селекция и гибридизация березы повислой в условиях сухой степи юго-востока европейской территории России // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 2. – С. 68–72.
18. Дьякова И.Н., Толстикова Т.Н. Оценка засухоустойчивости интродуцированных видов рода Quercus // Вестник Адыгейского гос. ун-та. Серия: Естественно-математические и технические науки. – 2010. – № 3. – С. 95–103.
19. Daai Z., Jinfeng G., Yiping Q. [et al.] Preliminary study on fecundity of common buckwheat under controlled conditions. Proceedings of the 12th International Symposium on Buckwheat; Laško, Slovenia, 2013; 172–174.
20. Evans J.R., Loreto F. Acquisition and diffusion of CO_2 in higher plant leaves. Photosynthesis: physiology and metabolism; ed. by R.C. Leegood, T.D. Sharkey, S. von Caemmerer. Dordrecht: Kluwer Academic, 2000; 321–351.
21. Flexas J., Medrano H. Drought-inhibition of photosynthesis in C_3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. Annals of Botany; 2002; 89: 183–189.
22. Якушкина Н.И., Бахтенко Е.Ю. Физиология растений. – М.: Владос, 2005. – 463 с.
23. Atkinson C.J., Policarpo M., Webster A.D., Kingswell G. Drought tolerance of clonal Malus determined from measurements of stomatal conductance and leaf water potential. Tree Physiology; 2000; 20: 557–563.
24. Евлаков П.М., Попова А.А., Рыжкова В.С. [и др.] Влияние засухи на фотосинтетические особенности, устьичную проводимость и эффективность использования воды у ювенильных растений дуба черешчатого (Quercus robur L.) // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2023. – № 4. – С. 63–74. – DOI: 10.21178/2079-6080.2023.63. – EDN PUMXPG.
25. Рост и газообмен CO2 у лесных деревьев: Рассчитана на физиологов растений, экологов, ботаников и лесоводов / Ю. Л. Цельникер, И. С. Малкина, А. Г. Ковалев [и др.]. – Москва: МАИК "Наука/Интерпериодика", 1993. – 256 с. – ISBN 5-02-004148-3. – EDN YRAZBJ.
26. Сазонова Т.А., Болондинский В.К., Придача В.Б., Новичонок Е.В. Влияние водного дефицита листа на фотосинтез березы повислой // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 10-4. – С. 595–597. – URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=10396 (дата обращения: 14.11.2025).
27. Arland A. Fiebernde Pflanzen – mehr Brot (Auf neun Wegen zur Steigerung der Kulturpflanzenerträge). – Berlin : Acad. Verlag, 1953. – S. 81–98.
28. Structural and functional peculiarities of plants from the genus Betula L. at early stages of ontogenesis / V. B. Pridacha, V. K. Bolondinskii, T. A. Sazonova, A. V. Olchev // Biology Bulletin. 2017; 44 (2):144-149. – DOI 10.1134/S1062359017020157. – EDN YVETFV.
29. Никитин С.Н. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах и динамика ростовых процессов при применении биологических препаратов // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 1. – С. 33–38. – URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36338 (дата обращения: 10.11.2025).
30. Qiao M. Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought / M. Qiao, C. Hong, Y. Jiao, S. Hou, H. Gao. Plants; 2024; 13 (13): 1808. – DOI: 10.3390/plants13131808.
31. Хмелевская И.А. Эколого-физиологические исследования древесных пород в г. Пскове // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2008. – № 6. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-fiziologicheskie-issledovaniya-drevesnyh-porod-v-g-pskove (дата обращения: 17.09.2025).
32. Arend M., Kuster T., Günthardt-Goerg M.S., Dobbertin M. Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (Quercus robur, Q. petraea and Q. pubescens). Tree Physiology; 2011; 31 (3): 287–297. – DOI: 10.1093/treephys/tpr004. – PMID: 21422189.
33. Turcsán A., Steppe K., Sárközi E. [et al.] Early summer drought stress during the first growing year stimulates extra shoot growth in oak seedlings (Quercus petraea L.). Frontiers in Plant Science; 2016; 7: 193. – DOI: 10.3389/fpls.2016.00193.

34. Kou J., Yan D., Qin B. [et al.] Physiological response mechanism of European birch (Betula pendula Roth) to PEG-induced drought stress and hydration. Frontiers in Plant Science; 2023; 14: 1226456. – DOI: 10.3389/fpls.2023.1226456.
35. Савельева Е.М., Тараканов И.Г. К проблеме регуляции фотосинтеза и водного обмена у растений рапса (Brassica napus L.) в онтогенезе // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2014. – С. 36–51.

References

1. Sergienko V. G., Konstantinov A. V. Prognoz vliyaniya izmeneniya klimata na raznoobrazie prirodnykh ekosistem i vidov floristicheskikh i faunisticheskikh kompleksov bioty Rossii. [Forecast of the impact of climate change on the diversity of natural ecosystems and species of floristic and faunistic complexes of Russian biota]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2016; (2): 29–44. (In Russ.). EDN WDJUGJ.
2. Kuznetsov V. V. Fiziologicheskie mekhanizmy adaptatsii khvoynykh k zasukhe. [Physiological mechanisms of conifer adaptation to drought]. Mekhanizmy ustoychivosti rasteniy i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy: materialy Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem (Irkutsk, 10–15 iyulya 2018 g.) = Mechanisms of plant and microorganism resistance to unfavorable environmental conditions: proceedings of the All-Russian conference with international participation (Irkutsk, July 10–15, 2018). Irkutsk: Obshchestvo fiziologov rasteniy Rossii; 2018. (In Russ.).
3. Amoah J.N., Seo Y.W. Effect of progressive drought stress on physio-biochemical responses and gene expression patterns in wheat. 3 Biotech. 2021; 11 (10): 440. DOI: 10.1007/s13205-021-02991-6.
4. Aliev R. T., Mamedova A. D., Guseinova T. N., Gadzhiev E. S. Razlichie v amplitude fiziologicheskikh parametrov nekotorykh sel'skokhozyaystvennykh rasteniy pri adaptatsii k stressu zasukhi. [Difference in the amplitude of physiological parameters of some agricultural plants during adaptation to drought stress]. Aktual'nye issledovaniya = Actual Research. 2022; (6) 85: 6–9. (In Russ.). URL: https://apni.ru/article/3711-razlichie-v-amplitude-fiziologicheskikh-param
5. Goncharova Yu. K., Kharitonov E. M., Ochkas N. A., Goncharov S. V., Svinarev S. V. Metody analiza i mekhanizmy ustoychivosti k zasukhe (obzor). [Methods of analysis and mechanisms of drought resistance (review)]. Risovodstvo = Rice Growing. 2020; (4) 49. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-analiza-i-mehanizmy-ustoychivosti-k-zasuhe-obzor (accessed: 12.11.2025).
6. Ashraf M., Harris P.J. Photosynthesis under stressful environments: An overview. Photosynthetica. 2013; 51 (2): 163–190.
7. Sevanto S. Phloem transport and drought. Journal of Experimental Botany. 2014; 65 (7): 1751–1759.
8. Reddy K.R., Zhao D. Interactive effects of elevated CO_2 and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton. Field Crops Research. 2005; 94 (2–3): 201–213.
9. Bertioli D.J., Cannon S.B., Froenicke L. [et al.] The genome sequences of Arachis duranensis and Arachis ipaensis, the diploid ancestors of cultivated peanut. Nature Genetics. 2016; 48 (4): 438–446.
10. Polley W.H. Implications of atmospheric and climate change for crop yield and water use efficiency. Crop Science. 2002; 42: 131–140.
11. Sun Y., Wang C., Chen H.Y.H., Ruan H. Response of plants to water stress: a meta-analysis. Frontiers in Plant Science. 2020; 11: 978. DOI: 10.3389/fpls.2020.00978.
12. Allagulova Ch. R., Yuldashev R. A., Avalbaev A. M. Uchastie oksida azota v regulyatsii razvitiya rasteniy i ikh ustoychivosti k defitsitu vlagi. [Involvement of nitric oxide in the regulation of plant development and their resistance to water deficit]. Fiziologiya rasteniy = Russian Journal of Plant Physiology. 2023; 70 (2): 134–153. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0015330323020015.
13. Zhukova O. I. Ekologicheskaya ustoichivost' populyatsii biotipov i form drevesnykh vidov k pochvennoy zasukhe. [Ecological stability of the population of biotypes and forms of tree species to soil drought]. Nauka. Mysl': elektronnyy periodicheskiy zhurnal = Science. Thought: electronic periodic journal. 2014; (1). (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-ustoychivost-populyatsii-biotipov-i-form-drevesnyh-vidov-k-pochvennoy-zasuhe (accessed: 16.09.2025).

14. Drozdov S. N., Kholoptseva E. S., Sazonova T. A. Sveto-temperaturnaya kharakteristika seyantsev berezy pushistoy (Betula pubescens Betulaceae). [Light and temperature characteristic of downy birch (Betula pubescens Betulaceae) seedlings]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2014; (1) 337. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sveto-temperaturnaya-harakteristika-seyantsev-berezy-pushistoy-betula-pubescens-betulaceae (accessed: 12.11.2025).
15. Bugaev V. A., Musievskiy A. L., Tsaralunga V. V. Dubravy lesostepi. [Oak forests of the forest-steppe]. Voronezh: VGLTU im. G.F. Morozova; 2013. 247 p. (In Russ.). ISBN 978-5-7994-0559-5.
16. Grodetskaya T. A., Evlakov P. M., Isakov I. Yu. Analiz ekspressii genov stressoustoychivosti v usloviyakh vozdeystviya zasukhi na rasteniya berezy v Tsentral'no-Chernozemnom regione. [Analysis of stress resistance gene expression under drought influence on birch plants in the Central Black Earth region]. Lesotekhnicheskiy zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2020; (2) 38. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ekspressii-genov-stressoustoychivosti-v-usloviyah-vozdeystviya-zasuhi-na-rasteniya-berezy-v-tsentralno-chernozemnom-regione (accessed: 10.11.2025).
17. Iozus A. P., Zav'yalov A. A. Seleksiya i gibridizatsiya berezy povisloy v usloviyakh sukhoy stepi yugo-vostoka evropeyskoy territorii Rossii. [Selection and hybridization of silver birch in the conditions of the dry steppe of the south-east of the European part of Russia]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research. 2019; (2): 68–72. (In Russ.).
18. D'yakova I. N., Tolstikova T. N. Otsenka zasukhoustoychivosti introducirovannykh vidov roda Quercus. [Assessment of drought resistance of introduced species of the genus Quercus]. Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Adyghe State University. The series "Natural-Mathematical and Technical Sciences". 2010; (3): 95–103. (In Russ.).
19. Daai Z., Jinfeng G., Yiping Q. [et al.] Preliminary study on fecundity of common buckwheat under controlled conditions. Proceedings of the 12th International Symposium on Buckwheat. Laško, Slovenia, 2013: 172–174.
20. Evans J.R., Loreto F. Acquisition and diffusion of CO_2 in higher plant leaves. In: Leegood R.C., Sharkey T.D., von Caemmerer S., editors. Photosynthesis: physiology and metabolism. Dordrecht: Kluwer Academic; 2000. p. 321–351.
21. Flexas J., Medrano H. Drought-inhibition of photosynthesis in C_3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. Annals of Botany. 2002; 89: 183–189.
22. Yakushkina N. I., Bakhtenko E. Yu. Fiziologiya rasteniy. [Plant physiology]. Moscow: Vlados; 2005. 463 p. (In Russ.).
23. Atkinson C.J., Policarpo M., Webster A.D., Kingswell G. Drought tolerance of clonal Malus determined from measurements of stomatal conductance and leaf water potential. Tree Physiology. 2000; 20: 557–563.
24. Evlakov P. M., Popova A. A., Ryzhkova V. S. [i dr.]. Vliyanie zasukhi na fotosinteticheskie osobennosti, ust'ichnuyu provodimost' i effektivnost' ispol'zovaniya vody u yuvenil'nykh rasteniy duba chereshchatogo (Quercus robur L.). [Influence of drought on photosynthetic traits, stomatal conductance and water use efficiency in juvenile pedunculate oak (Quercus robur L.) plants]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2023; (4): 63–74. (In Russ.). DOI: 10.21178/2079-6080.2023.63. EDN PUMXPG.
25. Tsel'niker Yu. L., Malkina I. S., Kovalev A. G. [i dr.]. Rost i gazoobmen CO_2 u lesnykh derev'ev: Rasschitana na fiziologov rasteniy, ehkologov, botanikov i lesovodov [Growth and CO_2 gas exchange in forest trees: For plant physiologists, ecologists, botanists and foresters]. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 1993. 256 p. (In Russ.). ISBN 5-02-004148-3. EDN YRAZBJ.
26. Sazonova T. A., Bolondinskiy V. K., Pridacha V. B., Novichonok E. V. Vliyanie vodnogo defitsita lista na fotosintez berezy povisloy. [Influence of leaf water deficit on photosynthesis of silver birch]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research. 2016; (10-4): 595–597. (In Russ.). URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=10396 (accessed: 14.11.2025).
27. Arland A. Fiebernde Pflanzen – mehr Brot (Auf neun Wegen zur Steigerung der Kulturpflanzenerträge). Berlin: Acad. Verlag; 1953. p. 81–98. (In German).
28. Structural and functional peculiarities of plants from the genus Betula L. at early stages of ontogenesis / V. B. Pridacha, V. K. Bolondinskii, T. A. Sazonova, A. V. Olchev // Biology Bulletin. 2017; 44 (2): 144-149. – DOI 10.1134/S1062359017020157. – EDN YVETFV.

29. Nikitin S. N. Fotosinteticheskaya deyatel'nost' rasteniy v posevakh i dinamika rostovykh protsessov pri primenenii biologicheskikh preparatov. [Photosynthetic activity of plants in crops and the dynamics of growth processes when using biological products]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences. 2017; (1): 33–38. (In Russ.). URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36338 (accessed: 10.11.2025).
30. Qiao M., Hong C., Jiao Y., Hou S., Gao H. Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. Plants. 2024; 13 (13): 1808. DOI: 10.3390/plants13131808.
31. Khmilevskaya I. A. Ekologo-fiziologicheskie issledovaniya drevesnykh porod v g. Pskove. [Ecological and physiological studies of tree species in the city of Pskov]. Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki = Pskov State University Bulletin. Series: Natural and Physical-Mathematical Sciences. 2008; (6). (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-fiziologicheskie-issledovaniya-drevesnyh-porod-v-g-pskove (accessed: 17.09.2025).
32. Arend M., Kuster T., Günthardt-Goerg M.S., Dobbertin M. Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (Quercus robur, Q. petraea and Q. pubescens). Tree Physiology. 2011; 31 (3): 287–297. DOI: 10.1093/treephys/tpr004. PMID: 21422189.
33. Turcsán A., Steppe K., Sárközi E. [et al.] Early summer drought stress during the first growing year stimulates extra shoot growth in oak seedlings (Quercus petraea L.). Frontiers in Plant Science. 2016; 7: 193. DOI: 10.3389/fpls.2016.00193.
34. Kou J., Yan D., Qin B. [et al.] Physiological response mechanism of European birch (Betula pendula Roth) to PEG-induced drought stress and hydration. Frontiers in Plant Science. 2023; 14: 1226456. DOI: 10.3389/fpls.2023.1226456.
35. Savel'eva E. M., Tarakanov I. G. K probleme regulyatsii fotosinteza i vodnogo obmena u rasteniy rapsa (Brassica napus L.) v ontogeneze. [On the problem of regulation of photosynthesis and water exchange in rapeseed plants (Brassica napus L.) during ontogenesis]. Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy. 2014: 36–51. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Попова Анна Александровна* – доктор с.-х. наук, и.о. зав. кафедрой Лесной генетики, биотехнологии и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-00034711-5377, e-mail: logachevaaa@rambler.ru.

Евлаков Петр Михайлович – канд. биол. наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0138-2410, e-mail: peter.evlakov@yandex.ru.

Попова Валентина Трофимовна – канд. биол. наук, заведущий кафедрой ботаники и дендрологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3765-7164, e-mail: bot-fiz.rast@yandex.ru.

Рыжкова Владлена Сергеевна – младший научный сотрудник, *аспирант* Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0009-0000-9727-3088, e-mail: vladlena.r11@yandex.ru.

Нартова Ирина Михайловна – ассистент, аспирант Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3629-2101, e-mail: irinka.m2015@yandex.ru.

Лебедев Вадим Георгиевич – канд. биол. наук, старший научный сотрудник Филиал Института биоорганической химии имени акад. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, г. Пущино, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8891-1719, e-mail: vglebedev@mail.ru.

Шестибратов Константин Александрович – канд. биол. наук, старший научный сотрудник, руководитель группы лесной биотехнологии Филиал Института биоорганической химии имени акад. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН г. Пущино, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1996-6433, e-mail: schestibratov.k@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Anna A. Popova* – Doctor of Agricultural Sciences, Acting Head of the Department of Forest Genetics, Biotechnology, and Plant Physiology, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-00034711-5377, e-mail: logachevaaa@rambler.ru.

Petr M. Evlakov – PhD in Biology, Head of Laboratory, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov" Voronezh, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0138-2410, e-mail: peter.evlakov@yandex.ru.

Valentina T. Popova – PhD in Biology, Head of the Department of Botany and Dendrology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov" Voronezh, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3765-7164, e-mail: bot-fiz.rast@yandex.ru.

Vladlena S. Ryzhkova – Junior Researcher, Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov" Voronezh, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0009-0000-9727-3088, e-mail: vladlena.r11@yandex.ru.

Irina M. Nartova – Assistant, Postgraduate Student Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov" Voronezh, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3629-2101, e-mail: irinka.m2015@yandex.ru.

Vadim G. Lebedev – Ph.D. in Biology, Senior Researcher Branch of the Institute of Bioorganic Chemistry named after Acad. M. M. Shemyakin and Yu. A. Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8891-1719, e-mail: vglebedev@mail.ru.

Konstantin A. Shestibratov – PhD in Biology, Senior Researcher, Head of the Forest Biotechnology Group, Branch of the M. M. Shemyakin and Yu. A. Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1996-6433, e-mail: schestibratov.k@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/14
УДК 58.01/.07

Изменения в экспрессии генов у чувствительного к засухе генотипа *Quercus robur* под воздействием стресса дефицита влаги

Анна А. Попова[1]✉, logachevaaa@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-4711-5377
Татьяна А. Гродецкая[1], tatyana.pokusina@yandex.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-5448-2792
Елена О. Видягина[2], vidjagina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4259-8293
Вадим Г. Лебедев[2], vglebedev@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-8891-1719

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация*
[2]*Филиал института биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН (ФИБХ), Проспект науки, 6, Пущино, 142290, Российская Федерация*

В данной работе был проведен транскриптомный анализ образцов чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L, в ходе которого было выявлено 60 генов, экспрессия которых была изменена относительно контроля в условиях водного дефицита. Данные гены принимают участие в метаболизме и биосинтезе липидов, регуляции синтеза малых молекул и фитогормонов, транспорте ионом металлов, антиоксидантной активности, а также в росте и развитии. Чувствительность к дефициту влаги у рассматриваемого генотипа *Q. robur* L обусловлена снижением эффективности утилизации активных форм кислорода (АФК) и поддержания целостности мембран, а также дисбалансом биосинтеза фитогормонов, ответственных за запуск каскадных реакций на абиотические стрессы. Среди генов с пониженным уровнем экспрессии особый интерес представляют белки COPT6 и металлотионеин-подобный белок. COPT6 принимают участие в трансмембранном транспорте ионов меди, что опосредованно влияет на биосинтез абцизовой кислоты – ключевого фитогормона, ответственного за адаптацию к засухе. В свою очередь снижение экспрессии гена металлотионеин-подобного белка в значительной степени влияет на концентрацию АФК и гомеостаз ионов Na^+. Следует также отметить WAT1-связанный белок At1g70260 и N-подобный белок устойчивости к вирусу табачной мозаики (TMV), изменение экспрессии которых в образцах рассматриваемого генотипа *Q. robur* L потенциально провоцирует запуск каскадных реакций, ассоциированных с салициловой кислотой. Полученные данные вносят вклад в понимание молекулярно-генетических основ адаптации древесных растений к абиотическим стрессам и открывают перспективы для применения молекулярных маркеров в селекционных программах.

Ключевые слова: *Quercus robur, дуб, засуха, транскриптом, дифференциальный анализ экспрессии генов*

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-64-00036).

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Попова А.А., Гродецкая Т.А., Видягина Е.О., Лебедев В.Г. Изменения в экспрессии генов у чувствительного к засухе генотипа *Quercus robur* под воздействием стресса дефицита влаги // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 234–255. – *Библиогр.: с. 243–250 (56 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/14.

Поступила 06.10.2025. ***Пересмотрена*** 10.12.2025. ***Принята*** 12.12.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Changes in gene expression in the drought-sensitive genotype *Quercus robur* under moisture stress

Anna A. Popova [1]✉, logachevaaa@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-4711-5377
Titiana A. Grodetskaya[1], tatyana.pokusina@yandex.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-5448-2792
Elena O. Vidyagina [2], vidjagina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4259-8293
Vadim G. Lebedev [2], vglebedev@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-8891-1719

[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva 8, Voronezh, 394087, Российская Федерация*
[2]*Branch of Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Prospect Nauki 6, Pushchino, Moscow Region, 142290, Российская Федерация*

Abstract

This study investigated the response of a drought-sensitive *Quercus robur* L. genotype, revealing 60 differentially expressed genes (DEGs) (15 upregulated and 45 downregulated). Functional enrichment analysis indicated the involvement of these DEGs in diverse biological processes, including lipid metabolism and biosynthesis, regulation of small molecule and phytohormone biosynthesis, metal ion transport, antioxidant activity, and growth and development. The results suggest that sensitivity to water deprivation in this *Q. robur* L. genotype may be associated with compromised reactive oxygen species (ROS) utilization and impaired membrane integrity maintenance, as well as imbalances in the biosynthesis of phytohormones relevant to abiotic stress responses, specifically abscisic acid (ABA) and jasmonic acid. Notably, downregulated DEGs encoding COPT6 and metallothionein-like protein type 2 were identified as potentially significant. COPT6, involved in transmembrane copper ion transport, may indirectly influence the biosynthesis of ABA, an important phytohormone in drought stress response. Furthermore, reduced expression of the metallothionein-like protein type 2 gene likely impacts ROS content and Na^+ ion homeostasis. Altered expression of WAT1-related protein At1g70260 and a TMV resistance protein N-like protein suggests potential activation of salicylic acid-mediated signaling pathways. These findings contribute to a more comprehensive understanding of the molecular genetic mechanisms of woody plant adaptation to abiotic stress and highlight potential candidate molecular markers for use in breeding programs aimed at enhancing drought tolerance.

Keywords: *Quercus robur, oak, drought, transcriptome, differentially expressed genes*

Funding: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 22-64-00036).

Acknowledgments: authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Popova A.A., Grodetskaya T.A., Vidyagina E.O., Lebedev V.G. (2025). Changes in gene expression in the drought-sensitive genotype *Quercus robur* under moisture stress. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 234-255 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/14.

Received 06.10.2025. ***Revised*** 10.12.2025. ***Accepted*** 12.12.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Возрастающая частота и интенсивность засух, обусловленные изменением климата, представляют собой ключевой фактор глобальной гибели деревьев [1]. Основными механизмами, снижающими жизненные показатели, выступают сбой в водоснабжении ксилемы и углеродное голодание при уменьшении проведения

питательных веществ от флоэмы. Состояние таких ослабленных растений также может усугубляться поражением различными фитопатогенами [2]. Такая наблюдаемая тенденция свидетельствует о возрастающей уязвимости лесных экосистем к климатическим стрессорам, что несет риски для их углерод-депонирующей функции и стабильности.

Дефицит влаги индуцирует у растений комплекс физиолого-биохимических ответных реакций, направленных на минимизацию потерь воды, что включает в себя закрытие устьиц для снижения транспирации, подавление ростовых процессов и фотосинтеза, а также активацию антиоксидантных систем для борьбы с окислительным стрессом, вызванным накоплением активных форм кислорода (АФК) [3]. Интенсивность и специфичность этих реакций варьируются в зависимости от вида растения, продолжительности и тяжести водного дефицита. Однако при экстремальных или продолжительных засухах эти компенсаторные механизмы оказываются недостаточными, что и приводит к патологическим процессам и дальнейшей гибели растений. При этом реакция на стресс демонстрирует значительную вариабельность на внутривидовом уровне, что определяет различия в засухоустойчивости между отдельными генотипами. В связи с этим задача сохранения и восстановления лесных экосистем, а также потребность в устойчивом лесопользовании обуславливает необходимость в поиске генотипов с повышенной засухоустойчивостью.

Среди древесных пород Северного полушария представители рода *Quercus* занимают особое положение, выступая доминантами в широком спектре лесных экосистем – от умеренных листопадных до тропических горных лесов [4,5]. В частности, дуб черешчатый *Quercus robur* L. является лесообразующим видом дубов в смешанных широколиственных лесах Европы [6]. Несмотря на то, что для представителей данного вида характерна наибольшая засухоустойчивость среди *Quercus* [7], современные наблюдения указывают на стремительное сокращение также и их популяций обусловленное засухой [8]. Это свидетельствует о наличии в природных популяциях чувствительных к дефициту влаги генотипов, изучение которых представляет особый интерес [7, 9, 10-12]. Их анализ позволяет не только идентифицировать маркеры низкой устойчивости для селекционной отбраковки, но и выявить «критические точки» сбоя защитных механизмов, что затруднительно при исследовании устойчивых форм, успешно компенсирующих стресс. Прямой отбор по фенотипическим признакам у дубов затруднен из-за длительного ювенильного периода, низкой семенной продуктивности, слабой корреляции признаков на разных этапах онтогенеза и сложностями вегетативного размножения [13]. Перспективной альтернативой выступает маркер-опосредованная селекция, основанная на идентификации генов-кандидатов, экспрессия которых изменяется в условиях водного дефицита [14].

Целью настоящего исследования явился транскриптомный анализ молекулярного ответа на засуху у ранее идентифицированного чувствительного генотипа дуба черешчатого *Q. robur* L. с применением технологии RNA-seq. В задачи входило выявление дифференциально экспрессирующихся генов, анализ их функционального профиля с использованием GO-классификации и KEGG-путей, а также идентификация ключевых генов-кандидатов, потенциально ответственных за повышенную чувствительность к дефициту влаги.

Материалы и методы

Растительный материал

В работе были использованы растения, выращенные из желудей 46-летнего дуба черешчатого *Q. robur* L из Семилукского лесного питомника в Воронежской области (Центральная часть Российской Федерации, 51°42′47″ с.ш.; 38°57′08″ в.д.). Дерево 339/57, являющееся потомком дуба из Шипова леса, расположенного на границе степной и лесостепной зон, было отобрано на основе многолетних наблюдений, включая сильные засухи 1992 и 2010 годов, как генотип, толерантный к водному стрессу. Сеянцы

культивировали в условиях теплицы в 4-литровых горшках с использованием смеси нейтрализованного верхового торфа с перлитом (3:1).

Условия выращивания

Условия водного дефицита на однолетних сеянцах моделировали, поддерживая опытные растения при низком содержании почвенной влаги (СПВ). Контрольные растения поддерживали при 80±5% СПВ, в опытных вариантах – до 45±5% СПВ. Для поддержания заданного СПВ каждый горшок взвешивали три раза в неделю и добавляли количество воды, равное убыли массы. Дефицит воды поддерживали в течение 60 суток эксперимента. Листовой материал собирали до и после эксперимента, фиксировали методом мгновенного замораживания в жидком азоте и хранили при температуре -80°C до дальнейших исследований.

RNA-Seq

Собранные ткани листьев быстро замораживали в жидком азоте и измельчали, после чего проводили выделение РНК с использованием модифицированного протокола CTAB [48]. Данный метод широко применяется для выделения ДНК, поскольку обеспечивает удаление полисахаридов и полифенолов, присутствие которых в растительных клетках может затруднить последующие эксперименты. Измельченный образцы растворяли в экстракционной среде, содержащей 2% поливинилпирролидона (ПВП), 100 мМ Трис-HCl (pH 8,0), 20 мМ ЭДТА, 1,4 М NaCl, и помещали в твердотельный термостат на 40 минут при температуре 65°C. Соотношение образца и экстракционного буфера составляло 1:10, что обеспечивало достаточную текучесть. Выделенные образцы растворяли в 50 мкл деионизированной воды и хранили при температуре -80°C до дальнейшего использования.

Качество РНК оценивали методом электрофореза в 1% агарозном геле с бромистым этидием. Визуализацию образцов РНК проводили с помощью системы VilberLourmat (Франция). Концентрацию РНК определяли на флуориметре Qubit 2.0 с использованием набора RNA BR Assay Kit (Thermo Fisher Scientific, США).

Библиотеки для RNA-Seq были подготовлены с помощью набора TruSeq Stranded mRNA (Illumina) в соответствии с протоколом производителя. Полученную библиотеку секвенировали на платформе Illumina Novaseq 6000. Исходные данные секвенирования были преобразованы в необработанные риды.

Анализ данных

Необработанные риды были отфильтрованы для удаления последовательностей низкого качества с помощью FastQC (v. 0.74) [49] и Trimmomatic (v. 0.39) [50]. Риды высокого качества были сопоставлены с референсным геномом GCF_932294415.1 (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_932294415.1/) с использованием публичного сервера Galaxy [51] и hisat2 (v. 2.2.1) [52] как инструмента выравнивания последовательностей.

Статистический анализ дифференциальной экспрессии проводили с помощью пакета featureCounts (v. 2.0.3) [53] и DESeq2 (v. 1.44.0) [54]. На основании матрицы счетов прочтений был создан объект «DESeqDataSet» с формулой дизайна [design = ~ condition], где фактор «condition» разделял образцы на контрольную группу и экспериментальную группу (образцы, подвергнутые засушливому стрессу). Перед анализом были отфильтрованы гены с суммарным количеством ридов менее 10 по всем четырем образцам. Дифференциально экспрессированными считались гены, удовлетворяющие двум критериям. Скорректированный p-value (padj) < 0.05 использовался для оценки статистической значимости, в то время как абсолютное значение $\log_2FC > 1$ – для оценки биологической значимости. Мера $\log_2FC$ рассчитывалась как двоичный логарифм отношения средних нормализованных уровней экспрессии между экспериментальной и контрольной группами. Данная метрика позволяет симметрично оценивать как активацию ($\log_2FC > 0$), так и репрессию ($\log_2FC < 0$) генов. Установленный порог $|\log_2FC| > 1$ отбирает гены двукратным

изменением экспрессии, что считается минимальным биологически релевантным эффектом.

Анализ обогащения Gene Ontology (GO-анализ) и принадлежности генов тому или иному метаболическому пути (KEGG) были выполнены с помощью онлайн-инструмента DAVID (https://davidbioinformatics.nih.gov/) [55]. Для выявления статистически значимо обогащенных GO-терминов использовался гипергеометрический тест. Полученные p-value были скорректированы для контроля уровня ложных открытий методом Бенджамини-Хохберга. Порог значимости для скорректированного p-value был установлен на уровне < 0.05.

Визуализация результатов GO-анализа и результатов DESeq2 была выполнена с использованием пакетов ggplot2 (v. 3.5.0) и GOPlot (v. 1.0.2) [56] в R (v. 4.4.0) и библиотек matplotlib (v. 3.10) и pandas (v. 2.2.3) в Python3 (v. 3.13.0).

Результаты

Для изучения ответа на водный дефицит у чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L. и идентификации маркерных генов был проведен транскриптомный анализ однолетних сеянцев. Характеристика данных РНК-секвенирования и качество сопоставления с референтным геномом (GCF_932294415.1) приведены ниже (табл. 1, табл. S1).

Оценка качества Q30 полученных ридов составила ≥87.48%, что соответствует эталонным стандартам в секвенировании нового поколения. Данный показатель свидетельствует о высокой точности определения нуклеотидов и обеспечивает надежность последующего биоинформатического анализа. Результаты картирования на референсный геном показали удовлетворительные значения (≥90.33%) и были использованы для анализа дифференциальной экспрессии генов.

Анализ дифференциальной экспрессии генов между контрольными образцами и образцами, подвергшимися засухе

Опытные сеянцы чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L. культивировали в течение 60 дней в условиях дефицита влаги. Выбранные условиях эксперимента соответствовали сухой и жаркой погоде второй половины лета в умеренном климатическом поясе. В ходе анализа дифференциальной экспрессии генов было идентифицировано 97 ДЭГ (37 с повышенной и 60 с пониженной экспрессией) при padj < 0.05, из которых 46 генов (13 с повышенной и 33 с пониженной экспрессией) были значимыми при padj < 0.01 (рис. 1, табл. S2).

После фильтрации генов по условиям padj < 0.05 и $|\log_2 FC| \geq 1.5$, количество ДЭГ было сокращено до 73 (28 с повышенным уровнем экспрессии и 45 с пониженным). Для визуализации глубин картирования ридов между контрольными и засушливыми образцами была построена кластеризованная тепловая карта (рис. 2).

Среди ДЭГ с повышенным уровнем экспрессии 13 генов (XR_007653907.1, XR_007655126.1, XM_050400395.1, XM_050406261.1, XM_050385441.1, XR_007655025.1, XM_050417287.1, XM_050416667.1, XM_050403688.1, XM_050404725.1, XM_050406199.1, XM_050400711.1, XM_050409266.1) являются артефактами, обусловленными их перепредставленностью лишь в одном образце, в то время как в двух других их экспрессия была сопоставима с контролем (рис. 2). Таким образом, общее количество достоверно определенных ДЭГ составило 60 (15 с повышенным уровнем экспрессии и 45 с пониженным). Ниже представлены ДЭГ, для которых значение – log10(padj) > 5 (рис. 1), а также ДЭГ с максимально измененной экспрессией ($\log_2 FC < -7$ и $\log_2 FC > 6$ для генов с пониженной и повышенной экспрессией, соответственно) (табл. 2).

Среди наиболее достоверных ДЭГ с пониженной экспрессией интерес представляют

белки-переносчика ионов меди COPT6 (XM_050393461.1, XM_050413937.1), GDSL-эстераза/липаза APG (XM_050429922.1), металлотионеин-подобный белок 2 (XM_050386643.1), транс-ресвератрол-ди-О-метилтрансфераза (XM_050423937.1) и транскрипционный фактор ERF107 (XM_050398437.1). Согласно литературным данным, эти белки принимают активное участие в реакциях растений на различные абиотические стрессы. COPT6 входит в семейство переносчиков ионов меди, локализованных преимущественно на плазматической мембране сосудистых тканей и репродуктивных органов растений [15]. В условиях низкого содержания меди экспрессия COPT6 значительно усиливается, что способствует биосинтезу абсцизовой кислоты (АБК) [16]. С другой стороны, члены семейства GDSL-эстераз/липаз (GELPs), характеризующиеся консервативным GDSL-мотивом на N-конце, широко распространены в тканях растений и играют важную роль в поддержании целостности мембран за счет модуляции липидного обмена и регулировании биосинтеза компонентов защитного барьера [17]. Кроме того, GELPs принимают участие в реакции на окислительный стресс. В частности, подавление гена *GhirGDSL26* в *Gossypium hirsutum* способствовала накоплению малонового диальдегида (МДА) и H_2O_2, а также снижению содержания пролина и активности супероксиддисмутазы (SOD) [18]. С другой стороны, сверхэкспрессия гена *AmGDSL1* из *Agropyron mongolicum* привела к повышенной засухоустойчивости трансгенного *Nicotiana benthamiana*, что выражалось в повышенном содержании пролина, высокой активности антиоксидантных ферментов (POD, SOD, CAT) и сниженной концентрации МДА [19].

Богатый цистеином металлотионеин-подобный белок 2 (MT2) выполняет роль поглотителя АФК, уменьшая окислительные повреждения в условиях абиотического стресса и поддерживая окислительно-восстановительный баланс клеток. В частности, воздействие засухи на проростки *Avena sativa* L способствовало повышению экспрессии MT2 в побегах и корнях [20]. Сверхэкспрессия гена *PdMT2A* из *Phoenix dactylifera* L. повышала толерантность трансгенного *Arabidopsis* к абиотическим стрессам [21]. Для трансгенных сеянцев были характерны более длинные корни, крупные листья и интенсивное накопление биомассы по сравнению с растениями дикого типа в условиях засухи, засоления и окислительного стресса. В условиях дефицита влаги содержание ионов Na^+ в тканях трансгенных растениях не отличалось от такового у диких растений, что указывает на важность MT2 в гомеостазе натрия. Кроме того, в условиях высокой солености и засухи наблюдалось снижение концентрации H_2O_2, высокая активность SOD, повышенное содержание хлорофилла и пролина.

Согласно базе данных KEGG, ген транс-ресвератрол-ди-О-метилтрансферазы участвует в синтезе птеростильбена и пицеатаннола из ресвератрола (KEGG ec00945). Ресвератрол и его структурные аналоги являются природными фитоалексинами, вырабатываемыми растениями, которые играют решающую роль в реакции растений на УФ-излучение [22] и недостаток воды [23]. Экзогенный ресвератрол значительно смягчил симптомы длительного воздействия высоких концентраций калийных удобрений у *Malus hupehensis* Rehd., поддерживая содержание хлорофилла, снижая содержание МДА и положительно влияя на активность POD, SOD и CAT [24,25].

Транскрипционный фактор ERF107 относится к подсемейству факторов чувствительности к этилену (ERF). Представители данного семейства активируются в ответ на различные абиотические стрессы и связываются со специфическими элементами ДНК (например, GCC-боксом) в промоторах стресс-чувствительных генов, что приводит к изменениям их экспрессии [26]. В настоящее время роль ERF107 в данном процессе остается неясной. Однако было показано, что сверхэкспрессия ERF107 повышала толерантность трансгенного *Arabidopsis* к оксилипинам, в частности к 9-гидрокси-10,12,15-октадекатриеновой кислоте (9-HOT, производное линоленовой

кислоты) [27]. Оксилипины являются продуктами окисления полиненасыщенных жирных кислот и накапливаются в клетках растений под действием стресса, что может приводить к частичной остановке клеточного цикла и ингибированию роста корневой системы [28]. В данном случае ERF107, предположительно активируя гены детоксикации, ослаблял ингибирующее действие 9-HOT на рост корней трансгенного *Arabidopsis*.

Таким образом, суммируя данные о функции генов, экспрессия которых в рассматриваемом генотипе *Q. robur* L. достоверно снижена (табл. 2), можно предварительно заключить, что его реакция на дефицит влаги обусловлена нарушением ионного гомеостаза (Cu, Na), влекущим за собой снижение синтеза АБК, а также ослаблением целостности мембран и усилением окислительного стресса, что в совокупности угнетает рост и развитие.

Среди ДЭГ с наибольшим изменением экспрессии следует отметить WAT1-связанный белок At1g70260 (XM_050422356.1) и N-подобный белок устойчивости к вирусу табачной мозаики (TMV) (XM_050398779.1).

WAT1-связанный белок At1g70260, экспрессия которого снижена у чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L., относится к семейству трансмембранных транспортеров. Его роль в реакции растений на абиотический стресс в настоящее время до конца не изучена. Однако было обнаружено, что WAT1 участвует в ремоделировании клеточной стенки у *Arabidopsis thaliana* за счет транспорта ауксина из вакуолей в цитоплазму [29]. Подавление гена *WAT1* у *A. thaliana* приводило к конститутивному повышению уровня салициловой кислоты в корнях, что обеспечивало устойчивость к сосудистым патогенам [30].

N-подобный белок устойчивости к TMV, повышенная экспрессия которого наблюдается у чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L. (табл. 2), опосредует защитный ответ растения на патогены, инициируя локальную реакцию гиперчувствительности. Данный защитный механизм, представляющий собой специализированную форму программируемой клеточной смерти, направлен на ограничение распространения патогена в месте заражения [31]. Его активация сопровождается индукцией биосинтеза салициловой кислоты, которая усиливает защитный сигналинг. С другой стороны, было показано, что N-подобный белок негативно регулирует толерантность *Nicotiana tabacum* к солевому стрессу, подавляя биосинтез абсцизовой и жасмонной кислот [32]. В экспериментах с трансгенным *N. tabacum* cv. Petite Havana SR1, характеризующимся отсутствием гена N-подобного белка чувствительности к TMV, и *N. tabacum* cv. Samsun NN, последний демонстрировал раннее пожелтение и увядание листьев после обработки раствором NaCl. Уровни МДА и H_2O_2 были значительно выше, чем у трансгенного табака, в то время как содержание воды и хлорофилла в листьях снизилось. Таким образом, активация N-подобного белка устойчивости к TMV в условиях высокой солености может приводить к окислительному повреждению клеточных мембран, нарушению водного гомеостаза и угнетению фотосинтеза.

Учитывая выше сказанное, можно сделать вывод, что снижение уровня экспрессии гена WAT1-связанный белок At1g70260 и увеличение экспрессии гена N-подобного белка устойчивости к TMV в образцах рассматриваемого генотипа *Q. robur* L. формирует гормональный дисбаланс, который может лежать в основе его повышенной чувствительности к водному дефициту. Наблюдаемый перекос в сторону салициловой кислоты может также объяснять повышенную экспрессию цистеин-богатой рецептороподобной протеинкиназы 10 (CRK10) (XM_050432786.1) (табл. 2). CRK10 относится к обширному семейству рецептороподобных киназ (RLK), участвующих в иммунном ответе, реакциях на абиотический стресс, а также в росте и развитии растений [33]. В работе [34] было показано, что при инфицировании суспензией *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000 или обработкой салициловой кислотой в клетках *Arabidopsis* активируется сигнальный каскад с участием транскрипционных факторов WRKY,

которые, в свою очередь, связываются с промоторной областью гена CRK10, обеспечивая быстрое накопления его мРНК.

Таким образом, выявленное смещение экспрессии генов создает условия для конститутивной активации элементов иммунного ответа, что в условиях засухи может обуславливать чувствительность к дефициту влаги генотипа *Q. robur* L.

GO-анализ для выявленных ДЭГ

Анализ обогащения Gene Ontology (GO-анализ) служит для статистической оценки функциональной принадлежности генов. В его основе лежит идентификация GO-категорий, частота встречаемости которых в целевом наборе генов статистически значимо превышает ожидаемую. Результатом анализа является ключевые биологические процессы, молекулярные функции и клеточные компоненты, ассоциированные с рассматриваемым набором генов.

В ходе GO-анализа ДЭГ для чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L. было определено, что 37 GO-терминов и путей KEGG были значимо обогащены (рис. 3, табл. S3-4).

Согласно полученным результатам, наиболее статистически значимые GO-термины в категории биологических процессов в основном были связаны с биосинтезом компонентов клеточной стенки (биосинтез липидов (GO:0008610), метаболизм липидов (GO:0006629)) и регуляцией синтеза малых молекул и фитогормонов (регуляция биосинтеза абсцизовой кислоты (GO:0010115), регуляция метаболизма изопреноидов (GO:0019747), регуляция биосинтеза спиртов (GO:1902930)). Статистически значимые GO-термины из категории молекулярной функции были связаны с оксидоредуктазной активностью, действующей на парных донорах, с включением или восстановлением молекулярного кислорода (GO:0016705), а также трансмембранным транспортом ионов металлов (активность трансмембранного переносчика ионов переходных металлов (GO:0046915), активность трансмембранного транспорта ионов меди (GO:0005375)). С транспортом также ассоциированы категории клеточных компонентов (апопласты (GO:0048046), внеклеточные регионы (GO:0005576)). Такая реакция не является типичной для дубов, у которых под воздействием засухи изменяется экспрессия генов, вовлеченных в реакцию на стимулы, оксидоредуктазную активность, регуляцию устьичной проводимости, биосинтез осмопротекторов и фотосинтез [7,10]. Данное обстоятельство делает рассматриваемый генотип *Q. robur* L. перспективным объектом для дальнейших исследований.

Следует также отметить гены гиббереллин-20-оксидазы 1 (XM_050397600.1), метилстеролмонооксигеназы 1-1 (XM_050408936.1), нодулин-связанных белков 1 и 2 (XM_050421370.1 и XM_050421373.1, соответственно), а также ЭПР-подобной омега-3-ацил-липидной десатуразы (XM_050383959.1), длинноцепочечной еноил-КоА редуктазы (VLCER) (XM_050386648.1).

Гиббереллин-20-оксидаза 1 и метилстеролмонооксигеназы 1-1 были отнесены к наибольшему количеству GO-терминов, что подчеркивает их критическую важность в реакции на дефицит влаги у рассматриваемого генотипа *Q. robur* L. Гиббереллин-20-оксидаза 1, экспрессия которой была снижена (табл. S2), участвует в биосинтезе дитерпеноидов, а именно гибберелиновых кислот (ГК) (KEGG ec00904). ГК синтезируются во всех сосудистых растениях и играют важную роль в росте и развитии растений [35]. В частности, сверхэкспрессия гена *PdGA20ox1* из *Pinus densiflora* в трансгенном тополе способствовала улучшению роста ствола и формирования древесины [36]. С другой стороны, подавление гена *OsGA20ox1* у *Oryza sativa* L. приводило к снижению уровня биологически активных ГК в вегетативных тканях, что вызывало полукарликовый фенотип растения [37]. Однако в условиях абиотического стресса, экспрессия гиббереллин-20-оксидазы 1 обычно снижается у различных видов растений, что приводит к снижению уровня ГК, замедлению роста и

повышению устойчивости к неблагоприятным условиям окружающей среды за счёт перераспределения ресурсов. Так, сверхэкспрессия гена *EguGA20ox1* из *Eucalyptus* в трансгенном *A. thaliana* значительно повышала чувствительность к солевому стрессу, что выражалось в сильном угнетении роста, хлорозе и увядании листьев, а также в двукратном снижении максимальной скорости транспорта электронов в фотосистеме II [38].

В свою очередь, метилстеролмонооксигеназа 1-1, экспрессия которой повышена у чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L., является важным ферментом в биосинтезе стеролов, ответственным за деметилирование промежуточных продуктов (KEGG ec00100). Содержание стеролов в растительных клетках увеличивается при тепловом стрессе, высокой засоленности, УФ-облучении и засухе [39]. В частности, накопление β-ситостерола, в синтезе которого принимает участие метилстеролмонооксигеназа, в клетках *Calotropis procera* индуцировалось засухой и интенсивным УФ [40]. Кроме того, было обнаружено, что стеролы участвуют в росте и развитии, регулируя морфологию растений, влияя на синтез и транспорт ауксинов [39].

Нодулин-связанные белки 1 и 2 также были отнесены к большому количеству GO-терминов (табл. S3). Экспрессия генов данных белков в значительной степени зависит факторов окружающей среды. В частности, сверхэкспрессия гена *NRP1* у трансгенного *A. thaliana* в условиях теплового стресса снижала содержание АБК [41]. Как известно, АБК-зависимый контроль устьичной проводимости является одной из реакций растений на недостаток воды.

Таким образом, наблюдаемое у чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L. снижение экспрессии генов гиббереллин-20-оксидазы 1 и нодулин-связанных белков 1 и 2, а также умеренное увеличение экспрессии гена метилстеролмонооксигеназы 1-1 согласуется с общепринятой стратегией адаптации к абиотическому стрессу у растений.

С другой стороны, роль обогащенных GO-терминами генов ЭПР-подобной омега-3-ацил-липидной десатуразы и VLCER в реакции рассматриваемого генотипа *Q. robur* L. на засуху представляет интерес. Данные ДЭГ, экспрессия которых снижена (табл. S2), принимают участие в метаболизме липидов, а именно в биосинтезе ненасыщенных жирных кислот (KEGG ko01040) и удлинении цепи жирных кислот (KEGG ec00062). В частности, омега-3-ацил-липидной десатураза катализирует присоединение третьей двойной связи в глицеролипиде, содержащем (9Z,12Z)-октадекадиеноил, в синтезе 18:3 жирных кислот, таких как альфа-линоленовая кислота, которая участвует в биосинтезе жасмоновой кислоты. Жасмоновая кислота является важным стресс-индуцированным фитогормоном, участвующим в многочисленных путях передачи сигналов, регуляции устьичной проводимости и поддержании ионного гомеостаза [42,43]. Для большинства видов *Quercus* spp. усиленный биосинтез жасмоната является одним из предпочтительных способов реагирования на недостаток воды [10]. Однако у рассматриваемого генотипа *Q. robur* L этот тип стрессовой реакции был частично подавлен, что можно объяснить продолжительностью воздействия засухи, поскольку интенсивный биосинтез жасмоната является частью ранней реакции на стресс, а повышение его уровня в клетках носит временный характер [44,45]. С другой стороны, VLCER также участвует в биосинтезе кутикулярных восков, таких как кутин и суберин, которые являются важными компонентами клеточной стенки сосудистых растений. Эти компоненты образуют гидрофобный слой, который предотвращает потерю воды и ионов Na^+ и регулирует теплопроводность, влияя на развитие устьиц [46,47]. Учитывая ранее упомянутое снижение экспрессии генов GDSL-эстеразы/липазы APG и WAT1-связанного белка At1g70260 (табл. 2), а также результаты GO-анализа (рис. 3), можно сделать вывод, что нарушения механизма поддержания целостности мембран вносит значительный вклад в чувствительность к засухе рассматриваемого генотипа *Q. robur* L.

Таким образом, комплексное нарушение экспрессии генов липидного и гормонального метаболизма приводит к каскаду физиологических нарушений: от сбоев в работе устьичного аппарата до разрушения клеточных мембран, что в совокупности объясняет повышенную чувствительность генотипа к засухе.

Заключение

Анализ функций ДЭГ с наиболее измененным уровнем экспрессии и наибольшей статистической достоверностью показал, что повышенная чувствительность к дефициту влаги у рассматриваемого генотипа дуба черешчатого *Q. robur* L. может быть связана с комплексом нарушений в системе гормональной регуляции и антиоксидантной защите. Снижение синтеза АБК, вызванное нарушением гомеостаза ионов меди, наряду со снижением синтеза жасмоновой кислоты, ослабляет эффективности связанных с этими фитогормонами каскадных реакций на абиотические стрессы. Одновременно наблюдается снижение эффективности удаления АФК и поддержания целостности мембран, что ведет к окислительному стрессу и нарушению гомеостаза ионов Na^+. На этом фоне предполагаемое повышение синтеза салициловой кислоты, с одной стороны, может отражать активацию альтернативных компенсаторных механизмов, а с другой – учитывая ее роль в ответе на биотические стрессы – потенциально вступать в конфликт с АБК-зависимыми путями формирования адаптации к засухе, что в совокупности делает этот ответ неадекватным.

Выводы о генах-кандидатах, ответственных за чувствительность дубов к засухе (COPT6, WAT1-связанный белок At1g70260, металлотионеин-подобный белок 2, GDSL-эстераза/липаза APG, N-подобный белок устойчивости к TMV, ЭПР-подобная омега-3-ацил-липидная десатураза и длинноцепочечная еноил-КоА редуктаза), закладывают основу для практического применения. В селекции растений эти гены могут быть использованы для разработки молекулярных маркеров для негативного отбора чувствительных к дефициту влаги генотипов дуба черешчатого. В области охраны природы они позволяют оценивать генетическую уязвимость естественных популяций дуба для разработки конкретных стратегий защиты.

Следует учитывать, что данные получены для одного чувствительного генотипа в контролируемых условиях, и для подтверждения диагностической ценности маркеров требуется их валидация на более широкой панели генотипов и дальнейшие функциональные исследования. Важным ограничением также является учет возможной посттранскрипционной регуляции, которая может влиять на конечную функциональную активность идентифицированных генов-кандидатов. В связи с этим, перспективным направлением дальнейших исследований является переход к глубокому системному анализу, включающему изучение ко-экспрессионных сетей и белковых взаимодействий. Такой подход может способствовать выявлению ключевых элементов регуляторных каскадов и уточнению молекулярных механизмов, лежащих в основе наблюдаемой чувствительности.

Список литературы

1. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H. (Ted), Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A. Rapid increase in log populations in drought-stressed mixed-conifer and ponderosa pine forests in Northern Arizona. Forest Ecology and Management, 2010; 259: 660–684. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001

2. Hartmann H. Carbon starvation during drought-induced tree mortality – are we chasing a myth? Journal of Plant Hydraulics, 2015; 2: e005–e005. – DOI: https://doi.org/10.20870/jph.2015.e005
3. Xu Z., Zhou G., Shimizu H. Plant responses to drought and rewatering. Plant Signal Behav, 2010; 5: 649–654. – DOI: https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11398
4. Vieitez A.M., Corredoira E., Martínez M.T., San-José M.C., Sánchez C., Valladares S., Vidal N., Ballester A. Application of biotechnological tools to *Quercus* improvement. Eur J Forest Res, 2012; 131: 519–539. – DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-011-0526-0
5. Denk T., Grimm G.W., Manos P.S., Deng M., Hipp A.L. An updated infrageneric classification of the oaks: review of previous taxonomic schemes and synthesis of evolutionary patterns// Oaks Physiological Ecology. Exploring the Functional Diversity of Genus Quercus L. ed. Gil-Pelegrín E., Peguero-Pina J.J., Sancho-Knapik D. Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 13–38. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69099-5_2
6. Mölder A., Sennhenn-Reulen H., Fischer C., Rumpf H., Schönfelder E., Stockmann J., Nagel R.-V. Success factors for high-quality oak forest (*Quercus robur*, *Q. petraea*) regeneration. Forest Ecosystems, 2019; 6: 49. – DOI: https://doi.org/10.1186/s40663-019-0206-y
7. Madritsch S., Wischnitzki E., Kotrade P., Ashoub A., Burg A., Fluch S., Brüggemann W., Sehr E.M.: Elucidating drought stress tolerance in European oaks through cross-species transcriptomics genes genomes genet. G3 Genes|Genomes|Genetics, 2019; 9: 3181–3199. – DOI: https://doi.org/10.1534/g3.119.400456
8. Macháčová M., Nakládal O., Samek M., Baťa D., Zumr V., Pešková V.: Oak decline caused by biotic and abiotic factors in Central Europe: a case study from the Czech Republic. Forests. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 13: 1223. – DOI: https://doi.org/10.3390/f13081223
9. Krutovsky K.V., Popova A.A., Yakovlev I.A., Yanbaev Y.A., Matveev S.M. Response of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) to adverse environmental conditions in genetic and dendrochronological studies plants. Plants, 2025; 14: 109. – DOI: https://doi.org/10.3390/plants14010109
10. Tikhomirova T.S., Krutovsky K.V., Shestibratov K.A. Molecular traits for adaptation to drought and salt stress in birch, oak and poplar species. Forests. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023; 14: 7. – DOI: https://doi.org/10.3390/f14010007
11. Le Provost G., Brachi B., Lesur I., Lalanne C., Labadie K., Aury J.-M., Da Silva C., Postolache D., Leroy T., Plomion C. Gene expression and genetic divergence in oak species highlight adaptive genes to soil water constraints. Plant Physiol, 2022; 190: 2466–2483. – DOI: https://doi.org/10.1093/plphys/kiac420
12. Trudić B., Draškić G., Provost G.L., Stojnić S., Pilipović A., Ivezić A. Expression profiles of 11 candidate genes involved in drought tolerance of pedunculate oak (*Quercus robur* L.). Possibilities for genetic monitoring of the species. Silvae Genetica, 2021; 70: 226–234. – DOI: https://doi.org/10.2478/sg-2021-0020
13. Wilhelm E. Somatic embryogenesis in oak (*Quercus spp.*) In Vitro Cell.Dev.Biol. Plant, 2000; 36: 349–357. – DOI: https://doi.org/10.1007/s11627-000-0062-y
14. Guimaraes, E.P., Ruane, J., Sonnino A., Scherf B., Dargie J. Marker assisted selection: current status and future perspectives, in crops, livestock, forestry and fish. ed. Butcher P., Southerton S. Rome: FAO, 2007. P. 284–328
15. Chen G., Li J., Han H., Du R., Wang X. Physiological and molecular mechanisms of plant responses to copper stress. International Journal of Molecular Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 23: 12950. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms232112950
16. Busoms S., Terés J., Yant L., Poschenrieder C., Salt D.E. Adaptation to coastal soils through pleiotropic boosting of ion and stress hormone concentrations in wild Arabidopsis thaliana. New Phytol., 2021; 232: 208–220. – DOI: https://doi.org/10.1111/nph.17569
17. Shen G., Sun W., Chen Z., Shi L., Hong J., Shi J. Plant GDSL esterases/lipases: evolutionary, physiological and molecular functions in plant development. Plants. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022: 11: 468. – DOI: https://doi.org/10.3390/plants11040468

18. Liu J., Liu J., Wang H., Khan A., Xu Y., Hou Y., Wang Y., Zhou Z., Zheng J., Liu F., Cai X. Genome wide identification of GDSL gene family explores a novel GhirGDSL26 gene enhancing drought stress tolerance in cotton. BMC Plant Biology, 2023: 23: 14. – DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-022-04001-0
19. Yan X., Wu X., Sun F., Nie H., Du X., Li X., Fang Y., Zhai Y., Zhao Y., Fan B., Ma Y. Cloning and Functional Study of AmGDSL1 in Agropyron mongolicum. Int J Mol Sci., 2024; 25: 9467. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms25179467
20. Konieczna W., Warchoł M., Mierek-Adamska A., Skrzypek E., Waligórski P., Piernik A., Dąbrowska G.B. Changes in physio-biochemical parameters and expression of metallothioneins in Avena sativa L. in response to drought. Sci Rep., 2023; 13: 2486. – DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-29394-2
21. Patankar H.V., Al-Harrasi I., Al Kharusi L., Jana G.A., Al-Yahyai R., Sunkar R., Yaish M.W. Overexpression of a metallothionein 2A gene from date palm confers abiotic stress tolerance to yeast and *Arabidopsis thaliana.* Int J Mol Sci, 2019; 20: 2871. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms20122871
22. Ogneva Z.V., Aleynova O.A., Suprun A.R., Karetin Y.A., Dubrovina A.S., Kiselev K.V. Tolerance of *Arabidopsis thaliana* plants overexpressing grapevine VaSTS1 or VaSTS7 genes to cold, heat, drought, salinity, and ultraviolet irradiation. Biologia plantarum, 2021; 65: 111–117. – DOI: https://doi.org/10.32615/bp.2020.139
23. Sun Y., Xi B., Dai H.: Effects of Water Stress on Resveratrol Accumulation and Synthesis in 'Cabernet Sauvignon' Grape Berries. Agronomy. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023; 13: 633. – DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13030633
24. Aleynova O.A., Ogneva Z.V., Suprun A.R., Ananev A.A., Nityagovsky N.N., Beresh A.A., Dubrovina A.S., Kiselev K.V. The effect of external treatment of *Arabidopsis thaliana* with plant-derived stilbene compounds on plant resistance to abiotic stresses. Plants, 2024; 13: 184. – DOI: https://doi.org/10.3390/plants13020184
25. Li T., Li Y., Sun Z., Xi X., Sha G., Ma C., Tian Y., Wang C., Zheng X. Resveratrol alleviates the KCl salinity stress of *Malus hupehensis* Rhed. Front Plant Sci., 2021; 12: 650485. – DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.650485
26. Y., Li X., Zhang J., Zhao H., Tan S., Xu W., Pan J., Yang F., Pi E. ERF subfamily transcription factors and their function in plant responses to abiotic stresses. Front. Plant Sci. Frontiers, 2022; 13: 1042084. – DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1042084
27. Walper E., Weiste C., Mueller M.J., Hamberg M., Dröge-Laser W. Screen Identifying Arabidopsis Transcription Factors Involved in the Response to 9-Lipoxygenase-Derived Oxylipins. PLOS ONE. Public Library of Science, 2016; 11: e0153216. – DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153216
28. Savchenko T.V., Zastrijnaja O.M., Klimov V.V. Oxylipins and plant abiotic stress resistance. Biochemistry (Mosc)., 2014; 79: 362–375. – DOI: https://doi.org/10.1134/S0006297914040051
29. Ranocha P., Dima O., Nagy R., Felten J., Corratgé-Faillie C., Novák O., Morreel K., Lacombe B., Martinez Y., Pfrunder S., Jin X., Renou J.-P., Thibaud J.-B., Ljung K., Fischer U., Martinoia E., Boerjan W., Goffner D. Arabidopsis WAT1 is a vacuolar auxin transport facilitator required for auxin homoeostasis. Nat. Commun., 2013; 4: 2625. – DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms3625
30. Denancé N. et al. Arabidopsis wat1 (walls are thin1)-mediated resistance to the bacterial vascular pathogen, *Ralstonia solanacearum*, is accompanied by cross-regulation of salicylic acid and tryptophan metabolism. The Plant Journal, 2013; 73: 225–239. – DOI: https://doi.org/10.1111/tpj.12027
31. Balint-Kurti P. The plant hypersensitive response: concepts, control and consequences. Mol Plant Pathol., 2019; 20: 1163–1178. – DOI: https://doi.org/10.1111/mpp.12821
32. Yang T., Xu Z.-P., Lv R., Zhu L.-S., Peng Q.-D., Qiu L., Tian Z.-H., Lin H.-H., Xi D.-H. N gene enhances resistance to Chilli veinal mottle virus and hypersensitivity to salt stress in tobacco. J Plant Physiol., 2018; 230: 92–100. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.08.013
33. Zhang Y., Tian H., Chen D., Zhang H., Sun M., Chen S., Qin Z., Ding Z., Dai S. Cysteine-rich receptor-like protein kinases: emerging regulators of plant stress responses. Trends Plant Sci., 2023; 28: 776–794. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.03.028

34. Du L., Chen Z. Identification of genes encoding receptor-like protein kinases as possible targets of pathogen- and salicylic acid-induced WRKY DNA-binding proteins in Arabidopsis. The Plant Journal, 2000; 24: 837–847. – DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2000.00923.x
35. Hedden P. The Current Status of Research on Gibberellin Biosynthesis. Plant Cell Physiol., 2020; 61: 1832–1849. – DOI: https://doi.org/10.1093/pcp/pcaa092
36. Park E.-J., Kim H.-T., Choi Y.-I., Lee C., Nguyen V.P., Jeon H.-W., Cho J.-S., Funada R., Pharis R.P., Kurepin L.V., Ko J.-H. Overexpression of gibberellin 20-oxidase1 from *Pinus densiflora* results in enhanced wood formation with gelatinous fiber development in a transgenic hybrid poplar. Tree Physiol., 2015; 35: 1264–1277. – DOI: https://doi.org/10.1093/treephys/tpv099
37. Oikawa T., Koshioka M., Kojima K., Yoshida H., Kawata M. A role of OsGA20ox1, encoding an isoform of gibberellin 20-oxidase, for regulation of plant stature in rice. Plant Mol Biol., 2004; 55: 687–700. – DOI: https://doi.org/10.1007/s11103-004-1692-y
38. Wu W., Zhu L., Wang P., Liao Y., Duan L., Lin K., Chen X., Li L., Xu J., Hu H., Xu Z.-F., Ni J. Transcriptome-Based Construction of the Gibberellin Metabolism and Signaling Pathways in Eucalyptus grandis × E. urophylla, and Functional Characterization of GA20ox and GA2ox in Regulating Plant Development and Abiotic Stress Adaptations. Int J Mol Sci., 2023; 24: 7051. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms24087051
39. Du Y., Fu X., Chu Y., Wu P., Liu Y., Ma L., Tian H., Zhu B.: Biosynthesis and the Roles of Plant Sterols in Development and Stress Responses. International Journal of Molecular Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 23: 2332. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23042332
40. Ramadan A.M., Azeiz A.A., Baabad S., Hassanein S., Gadalla N.O., Hassan S., Algandaby M., Bakr S., Khan T., Abouseadaa H.H., Ali H.M., Al-Ghamdi A., Osman G., Edris S., Eissa H., Bahieldin A. Control of β-sitosterol biosynthesis under light and watering in desert plant Calotropis procera. Steroids, 2019; 141: 1–8. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.steroids.2018.11.003
41. Fu Q., Li S., Yu D. Identification of an Arabidopsis Nodulin-Related Protein in Heat Stress. Molecules and Cells, 2010; 29: 77–84. – DOI: https://doi.org/10.1007/s10059-010-0005-3
42. Ali Md.S., Baek K.-H. Jasmonic Acid Signaling Pathway in Response to Abiotic Stresses in Plants. Int J Mol Sci., 2020; 21: 621. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms21020621
43. Riemann M., Dhakarey R., Hazman M., Miro B., Kohli A., Nick P. Exploring Jasmonates in the hormonal network of drought and salinity responses. Front. Plant Sci. Frontiers, 2015; 6: 1077. – DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01077
44. Glauser G., Grata E., Dubugnon L., Rudaz S., Farmer E.E., Wolfender J.-L. Spatial and temporal dynamics of jasmonate synthesis and accumulation in *Arabidopsis* in response to wounding. Journal of Biological Chemistry, 2008; 283: 16400–16407. – DOI: https://doi.org/10.1074/jbc.M801760200
45. Li P., Liu H., Li F., Liao X., Ali S., Hou M. A virus plays a role in partially suppressing plant defenses induced by the viruliferous vectors. Scientific Reports. Nature Publishing Group, 2018; 8: 9027. – DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-27354-9
46. Yang J., Isabel Ordiz M., Jaworski J.G., Beachy R.N. Induced accumulation of cuticular waxes enhances drought tolerance in Arabidopsis by changes in development of stomata. Plant Physiology and Biochemistry, 2011; 49: 1448–1455. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.09.006
47. de Silva N.D.G., Murmu J., Chabot D., Hubbard K., Ryser P., Molina I., Rowland O. Root suberin plays important roles in reducing water loss and sodium uptake in *Arabidopsis thaliana*. Metabolites, 2021; 11: 735. – DOI: https://doi.org/10.3390/metabo11110735
48. Grodetskaya T., Fedorova O., Evlakov P. Optimized method for RNA extraction from leaves of forest tree species. Voronezh: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2021; 875: 012008. – DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012008
49. Andrews S. URL: http://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc/ (accessed: 26.04.2023)

50. Bolger A.M., Lohse M., Usadel B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data Bioinformatics, 2014; 30: 2114–2120. – DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu170
51. Afgan E. et al. The Galaxy platform for accessible, reproducible and collaborative biomedical analyses: 2016 update. Nucleic Acids Res., 2016; 44: W3–W10. – DOI: https://doi.org/10.1093/nar/gkw343
52. Kim D., Langmead B., Salzberg S.L.: HISAT: a fast spliced aligner with low memory requirements. Nat Methods. Nature Publishing Group, 2015; 12: 357–360. – DOI: https://doi.org/10.1038/nmeth.3317
53. Liao Y., Smyth G.K., Shi W. FeatureCounts: an efficient general purpose program for assigning sequence reads to genomic features Bioinformatics, 2014; 30: 923–930. – DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt656
54. Love M.I., Huber W., Anders S. Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2. Genome Biology, 2014; 15: 550. – DOI: https://doi.org/10.1186/s13059-014-0550-8
55. Sherman B.T., Hao M., Qiu J., Jiao X., Baseler M.W., Lane H.C., Imamichi T., Chang W. DAVID: a web server for functional enrichment analysis and functional annotation of gene lists (2021 update). Nucleic Acids Res., 2022; 50: W216–W221. – DOI: https://doi.org/10.1093/nar/gkac194
56. Walter W., Sánchez-Cabo F., Ricote M. GOplot: an R package for visually combining expression data with functional analysis. Bioinformatics, 2015; 31: 2912–2914. – DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv300

References

1. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H. (Ted), Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A. Rapid increase in log populations in drought-stressed mixed-conifer and ponderosa pine forests in Northern Arizona. Forest Ecology and Management, 2010; 259: 660–684. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001
2. Hartmann H. Carbon starvation during drought-induced tree mortality – are we chasing a myth? Journal of Plant Hydraulics, 2015; 2: e005–e005. – DOI: https://doi.org/10.20870/jph.2015.e005
3. Xu Z., Zhou G., Shimizu H. Plant responses to drought and rewatering. Plant Signal Behav, 2010; 5: 649–654. – DOI: https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11398
4. Vieitez A.M., Corredoira E., Martínez M.T., San-José M.C., Sánchez C., Valladares S., Vidal N., Ballester A. Application of biotechnological tools to *Quercus* improvement. Eur J Forest Res, 2012; 131: 519–539. – DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-011-0526-0
5. Denk T., Grimm G.W., Manos P.S., Deng M., Hipp A.L. An updated infrageneric classification of the oaks: review of previous taxonomic schemes and synthesis of evolutionary patterns// Oaks Physiological Ecology. Exploring the Functional Diversity of Genus Quercus L. ed. Gil-Pelegrín E., Peguero-Pina J.J., Sancho-Knapik D. Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 13–38. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69099-5_2
6. Mölder A., Sennhenn-Reulen H., Fischer C., Rumpf H., Schönfelder E., Stockmann J., Nagel R.-V. Success factors for high-quality oak forest (*Quercus robur*, *Q. petraea*) regeneration. Forest Ecosystems, 2019; 6: 49. – DOI: https://doi.org/10.1186/s40663-019-0206-y
7. Madritsch S., Wischnitzki E., Kotrade P., Ashoub A., Burg A., Fluch S., Brüggemann W., Sehr E.M.: Elucidating drought stress tolerance in European oaks through cross-species transcriptomics genes genomes genet. G3 Genes|Genomes|Genetics, 2019; 9: 3181–3199. – DOI: https://doi.org/10.1534/g3.119.400456
8. Macháčová M., Nakládal O., Samek M., Baťa D., Zumr V., Pešková V.: Oak decline caused by biotic and abiotic factors in Central Europe: a case study from the Czech Republic. Forests. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 13: 1223. – DOI: https://doi.org/10.3390/f13081223
9. Krutovsky K.V., Popova A.A., Yakovlev I.A., Yanbaev Y.A., Matveev S.M. Response of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) to adverse environmental conditions in genetic and dendrochronological studies plants. Plants, 2025; 14: 109. – DOI: https://doi.org/10.3390/plants14010109

10. Tikhomirova T.S., Krutovsky K.V., Shestibratov K.A. Molecular traits for adaptation to drought and salt stress in birch, oak and poplar species. Forests. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023; 14: 7. – DOI: https://doi.org/10.3390/f14010007
11. Le Provost G., Brachi B., Lesur I., Lalanne C., Labadie K., Aury J.-M., Da Silva C., Postolache D., Leroy T., Plomion C. Gene expression and genetic divergence in oak species highlight adaptive genes to soil water constraints. Plant Physiol, 2022; 190: 2466–2483. – DOI: https://doi.org/10.1093/plphys/kiac420
12. Trudić B., Draškić G., Provost G.L., Stojnić S., Pilipović A., Ivezić A. Expression profiles of 11 candidate genes involved in drought tolerance of pedunculate oak (*Quercus robur* L.). Possibilities for genetic monitoring of the species. Silvae Genetica, 2021; 70: 226–234. – DOI: https://doi.org/10.2478/sg-2021-0020
13. Wilhelm E. Somatic embryogenesis in oak (*Quercus spp.*) In Vitro Cell.Dev.Biol. Plant, 2000; 36: 349–357. – DOI: https://doi.org/10.1007/s11627-000-0062-y
14. Guimaraes, E.P., Ruane, J., Sonnino A., Scherf B., Dargie J. Marker assisted selection: current status and future perspectives, in crops, livestock, forestry and fish. ed. Butcher P., Southerton S. Rome: FAO, 2007. P. 284–328
15. Chen G., Li J., Han H., Du R., Wang X. Physiological and molecular mechanisms of plant responses to copper stress. International Journal of Molecular Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 23: 12950. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms232112950
16. Busoms S., Terés J., Yant L., Poschenrieder C., Salt D.E. Adaptation to coastal soils through pleiotropic boosting of ion and stress hormone concentrations in wild Arabidopsis thaliana. New Phytol., 2021; 232: 208–220. – DOI: https://doi.org/10.1111/nph.17569
17. Shen G., Sun W., Chen Z., Shi L., Hong J., Shi J. Plant GDSL esterases/lipases: evolutionary, physiological and molecular functions in plant development. Plants. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022: 11: 468. – DOI: https://doi.org/10.3390/plants11040468
18. Liu J., Liu J., Wang H., Khan A., Xu Y., Hou Y., Wang Y., Zhou Z., Zheng J., Liu F., Cai X. Genome wide identification of GDSL gene family explores a novel GhirGDSL26 gene enhancing drought stress tolerance in cotton. BMC Plant Biology, 2023: 23: 14. – DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-022-04001-0
19. Yan X., Wu X., Sun F., Nie H., Du X., Li X., Fang Y., Zhai Y., Zhao Y., Fan B., Ma Y. Cloning and Functional Study of AmGDSL1 in Agropyron mongolicum. Int J Mol Sci., 2024; 25: 9467. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms25179467
20. Konieczna W., Warchoł M., Mierek-Adamska A., Skrzypek E., Waligórski P., Piernik A., Dąbrowska G.B. Changes in physio-biochemical parameters and expression of metallothioneins in Avena sativa L. in response to drought. Sci Rep., 2023; 13: 2486. – DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-29394-2
21. Patankar H.V., Al-Harrasi I., Al Kharusi L., Jana G.A., Al-Yahyai R., Sunkar R., Yaish M.W. Overexpression of a metallothionein 2A gene from date palm confers abiotic stress tolerance to yeast and *Arabidopsis thaliana.* Int J Mol Sci, 2019; 20: 2871. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms20122871
22. Ogneva Z.V., Aleynova O.A., Suprun A.R., Karetin Y.A., Dubrovina A.S., Kiselev K.V. Tolerance of *Arabidopsis thaliana* plants overexpressing grapevine VaSTS1 or VaSTS7 genes to cold, heat, drought, salinity, and ultraviolet irradiation. Biologia plantarum, 2021; 65: 111–117. – DOI: https://doi.org/10.32615/bp.2020.139
23. Sun Y., Xi B., Dai H.: Effects of Water Stress on Resveratrol Accumulation and Synthesis in 'Cabernet Sauvignon' Grape Berries. Agronomy. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023; 13: 633. – DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13030633
24. Aleynova O.A., Ogneva Z.V., Suprun A.R., Ananev A.A., Nityagovsky N.N., Beresh A.A., Dubrovina A.S., Kiselev K.V. The effect of external treatment of *Arabidopsis thaliana* with plant-derived stilbene compounds on plant resistance to abiotic stresses. Plants, 2024; 13: 184. – DOI: https://doi.org/10.3390/plants13020184
25. Li T., Li Y., Sun Z., Xi X., Sha G., Ma C., Tian Y., Wang C., Zheng X. Resveratrol alleviates the KCl salinity stress of *Malus hupehensis* Rhed. Front Plant Sci., 2021; 12: 650485. – DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.650485

26. Y., Li X., Zhang J., Zhao H., Tan S., Xu W., Pan J., Yang F., Pi E. ERF subfamily transcription factors and their function in plant responses to abiotic stresses. Front. Plant Sci. Frontiers, 2022; 13: 1042084. – DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1042084
27. Walper E., Weiste C., Mueller M.J., Hamberg M., Dröge-Laser W. Screen Identifying Arabidopsis Transcription Factors Involved in the Response to 9-Lipoxygenase-Derived Oxylipins. PLOS ONE. Public Library of Science, 2016; 11: e0153216. – DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153216
28. Savchenko T.V., Zastrijnaja O.M., Klimov V.V. Oxylipins and plant abiotic stress resistance. Biochemistry (Mosc)., 2014; 79: 362–375. – DOI: https://doi.org/10.1134/S0006297914040051
29. Ranocha P., Dima O., Nagy R., Felten J., Corratgé-Faillie C., Novák O., Morreel K., Lacombe B., Martinez Y., Pfrunder S., Jin X., Renou J.-P., Thibaud J.-B., Ljung K., Fischer U., Martinoia E., Boerjan W., Goffner D. Arabidopsis WAT1 is a vacuolar auxin transport facilitator required for auxin homoeostasis. Nat. Commun., 2013; 4: 2625. – DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms3625
30. Denancé N. et al. Arabidopsis wat1 (walls are thin1)-mediated resistance to the bacterial vascular pathogen, *Ralstonia solanacearum*, is accompanied by cross-regulation of salicylic acid and tryptophan metabolism. The Plant Journal, 2013; 73: 225–239. – DOI: https://doi.org/10.1111/tpj.12027
31. Balint-Kurti P. The plant hypersensitive response: concepts, control and consequences. Mol Plant Pathol., 2019; 20: 1163–1178. – DOI: https://doi.org/10.1111/mpp.12821
32. Yang T., Xu Z.-P., Lv R., Zhu L.-S., Peng Q.-D., Qiu L., Tian Z.-H., Lin H.-H., Xi D.-H. N gene enhances resistance to Chilli veinal mottle virus and hypersensitivity to salt stress in tobacco. J Plant Physiol., 2018; 230: 92–100. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.08.013
33. Zhang Y., Tian H., Chen D., Zhang H., Sun M., Chen S., Qin Z., Ding Z., Dai S. Cysteine-rich receptor-like protein kinases: emerging regulators of plant stress responses. Trends Plant Sci., 2023; 28: 776–794. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.03.028
34. Du L., Chen Z. Identification of genes encoding receptor-like protein kinases as possible targets of pathogen- and salicylic acid-induced WRKY DNA-binding proteins in Arabidopsis. The Plant Journal, 2000; 24: 837–847. – DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2000.00923.x
35. Hedden P. The Current Status of Research on Gibberellin Biosynthesis. Plant Cell Physiol., 2020; 61: 1832–1849. – DOI: https://doi.org/10.1093/pcp/pcaa092
36. Park E.-J., Kim H.-T., Choi Y.-I., Lee C., Nguyen V.P., Jeon H.-W., Cho J.-S., Funada R., Pharis R.P., Kurepin L.V., Ko J.-H. Overexpression of gibberellin 20-oxidase1 from *Pinus densiflora* results in enhanced wood formation with gelatinous fiber development in a transgenic hybrid poplar. Tree Physiol., 2015; 35: 1264–1277. – DOI: https://doi.org/10.1093/treephys/tpv099
37. Oikawa T., Koshioka M., Kojima K., Yoshida H., Kawata M. A role of OsGA20ox1, encoding an isoform of gibberellin 20-oxidase, for regulation of plant stature in rice. Plant Mol Biol., 2004; 55: 687–700. – DOI: https://doi.org/10.1007/s11103-004-1692-y
38. Wu W., Zhu L., Wang P., Liao Y., Duan L., Lin K., Chen X., Li L., Xu J., Hu H., Xu Z.-F., Ni J. Transcriptome-Based Construction of the Gibberellin Metabolism and Signaling Pathways in Eucalyptus grandis × E. urophylla, and Functional Characterization of GA20ox and GA2ox in Regulating Plant Development and Abiotic Stress Adaptations. Int J Mol Sci., 2023; 24: 7051. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms24087051
39. Du Y., Fu X., Chu Y., Wu P., Liu Y., Ma L., Tian H., Zhu B.: Biosynthesis and the Roles of Plant Sterols in Development and Stress Responses. International Journal of Molecular Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 23: 2332. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23042332
40. Ramadan A.M., Azeiz A.A., Baabad S., Hassanein S., Gadalla N.O., Hassan S., Algandaby M., Bakr S., Khan T., Abouseadaa H.H., Ali H.M., Al-Ghamdi A., Osman G., Edris S., Eissa H., Bahieldin A. Control of β-sitosterol biosynthesis under light and watering in desert plant Calotropis procera. Steroids, 2019; 141: 1–8. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.steroids.2018.11.003

41. Fu Q., Li S., Yu D. Identification of an Arabidopsis Nodulin-Related Protein in Heat Stress. Molecules and Cells, 2010; 29: 77–84. – DOI: https://doi.org/10.1007/s10059-010-0005-3
42. Ali Md.S., Baek K.-H. Jasmonic Acid Signaling Pathway in Response to Abiotic Stresses in Plants. Int J Mol Sci., 2020; 21: 621. – DOI: https://doi.org/10.3390/ijms21020621
43. Riemann M., Dhakarey R., Hazman M., Miro B., Kohli A., Nick P. Exploring Jasmonates in the hormonal network of drought and salinity responses. Front. Plant Sci. Frontiers, 2015; 6: 1077. – DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01077
44. Glauser G., Grata E., Dubugnon L., Rudaz S., Farmer E.E., Wolfender J.-L. Spatial and temporal dynamics of jasmonate synthesis and accumulation in *Arabidopsis* in response to wounding. Journal of Biological Chemistry, 2008; 283: 16400–16407. – DOI: https://doi.org/10.1074/jbc.M801760200
45. Li P., Liu H., Li F., Liao X., Ali S., Hou M. A virus plays a role in partially suppressing plant defenses induced by the viruliferous vectors. Scientific Reports. Nature Publishing Group, 2018; 8: 9027. – DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-27354-9
46. Yang J., Isabel Ordiz M., Jaworski J.G., Beachy R.N. Induced accumulation of cuticular waxes enhances drought tolerance in Arabidopsis by changes in development of stomata. Plant Physiology and Biochemistry, 2011; 49: 1448–1455. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.09.006
47. de Silva N.D.G., Murmu J., Chabot D., Hubbard K., Ryser P., Molina I., Rowland O. Root suberin plays important roles in reducing water loss and sodium uptake in *Arabidopsis thaliana*. Metabolites, 2021; 11: 735. – DOI: https://doi.org/10.3390/metabo11110735
48. Grodetskaya T., Fedorova O., Evlakov P. Optimized method for RNA extraction from leaves of forest tree species. Voronezh: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2021; 875: 012008. – DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012008
49. Andrews S. URL: http://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc/ (accessed: 26.04.2023)
50. Bolger A.M., Lohse M., Usadel B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data Bioinformatics, 2014; 30: 2114–2120. – DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu170
51. Afgan E. et al. The Galaxy platform for accessible, reproducible and collaborative biomedical analyses: 2016 update. Nucleic Acids Res., 2016; 44: W3–W10. – DOI: https://doi.org/10.1093/nar/gkw343
52. Kim D., Langmead B., Salzberg S.L.: HISAT: a fast spliced aligner with low memory requirements. Nat Methods. Nature Publishing Group, 2015; 12: 357–360. – DOI: https://doi.org/10.1038/nmeth.3317
53. Liao Y., Smyth G.K., Shi W. FeatureCounts: an efficient general purpose program for assigning sequence reads to genomic features Bioinformatics, 2014; 30: 923–930. – DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt656
54. Love M.I., Huber W., Anders S. Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2. Genome Biology, 2014; 15: 550. – DOI: https://doi.org/10.1186/s13059-014-0550-8
55. Sherman B.T., Hao M., Qiu J., Jiao X., Baseler M.W., Lane H.C., Imamichi T., Chang W. DAVID: a web server for functional enrichment analysis and functional annotation of gene lists (2021 update). Nucleic Acids Res., 2022; 50: W216–W221. – DOI: https://doi.org/10.1093/nar/gkac194
56. Walter W., Sánchez-Cabo F., Ricote M. GOplot: an R package for visually combining expression data with functional analysis. Bioinformatics, 2015; 31: 2912–2914. – DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv300

Сведения об авторах

✉ *Попова Анна Александровна* – доктор с.-х. наук, и.о. зав. кафедрой Лесной генетики, биотехнологии и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-00034711-5377, e-mail: logachevaaa@rambler.ru.

Гродецкая Татьяна Александровна – канд. биол. наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный

лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-5448-2792, e-mail: tatyana.pokusina@yandex.ru

Видягина Елена Олеговна – кандидат биологических наук, н.с. группы лесной биотехнологии, Филиал ГНЦ ФГБУН Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова Российской академии наук (ФИБХ), Проспект науки 6, г. Пущино, Российская Федерация, 142290, ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4259-8293, vidjagina@mail.ru.

Лебедев Вадим Георгиевич – кандидат биологических наук, с.н.с. группы лесной биотехнологии, Филиал ГНЦ ФГБУН Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова Российской академии наук (ФИБХ), Проспект науки 6, г. Пущино, Российская Федерация, 142290, ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8891-1719, vglebedev@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Anna A. Popova* – Doctor of Agricultural Sciences, Acting Head of the Department of Forest Genetics, Biotechnology, and Plant Physiology, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-00034711-5377, e-mail: logachevaaa@rambler.ru.

Titiana A. Grodetskaya – Cand. Sci. (Biol.) Laboratory, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov" Voronezh, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5448-2792, e-mail: tatyana.pokusina@yandex.ru.

Elena O. Vidyagina – Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Laboratory of Forest biotechnology, Branch of Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Prospect Nauki 6, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia, ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4259-8293, vidjagina@mail.ru.

Vadim G. Lebedev – Ph.D. in Biology, Senior Researcher Branch of the Institute of Bioorganic Chemistry named after Acad. M. M. Shemyakin and Yu. A. Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8891-1719, e-mail: vglebedev@mail.ru

✉ Для контактов | Corresponding author

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Статистика секвенирования и качество картирования для образцов чувствительного к засухе генотипа *Quercus robur*

Table 1

RNA-seq statistics and mapping quality for drought-sensitive genotype *Quercus robur* L samples

Название образца|Sample	Условия культивирования|Conditions	Общее число видов|Number of reads	Средний GC-состав, %|Average GC-content, %	Качество картирования, %|Mapping quality, %
S9655Nr13	Контроль, 60 д	37 712 792	45	90.48
S9655Nr16	Дефицит влаги, 60 д	34 779 652	43	91.08
S9655Nr18	Дефицит влаги, 60 д	31 337 128	44	90.57
S9655Nr19	Дефицит влаги, 60 д	36 910 472	42	90.33

Таблица 2

ДЭГ с максимально измененной экспрессией и наибольшей статистической достоверностью

Table 2

DEGs with the most altered expression and the highest statistical significance

ID	Продукт|Product	Log_2FC	padj	-log10(padj)
	LOC126706893, мРНК COPT6-подобный белок эстераза/липаза APG COPT6-подобный белок LOC126722704, некодирующая РНК Металлотионеин-подобный белок, тип 2 LOC126708890, некодирующая РНК Транс-ресвератрол-ди-О-метилтрансфераза			
	LOC126708810, мРНК	-2.222	2.59E-07	6.587
XM_050398437.1	Транскрипционный фактор ERF107	-1.929	8.71E-07	6.060
X	LOC126707050, мРНК LOC126720058, некодирующая РНК WAT1-связанный белок At1g70260 LOC126718368, мРНК Серин-треониновая протеинкиназа PBL9 (вероятная) N-подобный белок устойчивости к вирусу табачной мозаики (TMV) Цистеин-богатая рецептороподобная протеинкиназа 10 (vX3)			

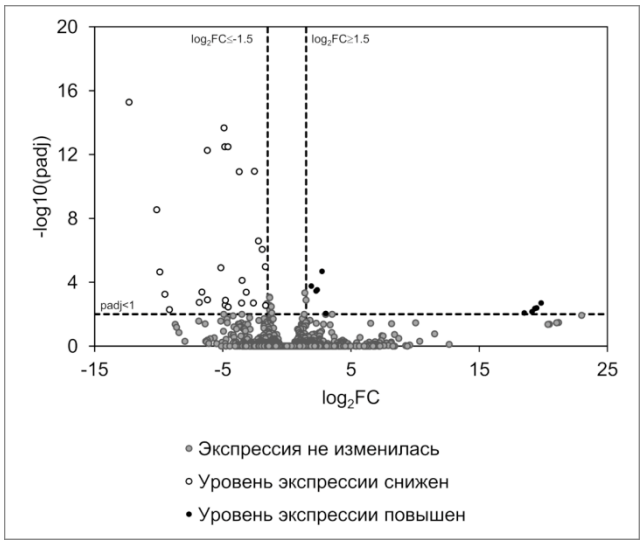


Рисунок 1. Диаграмма типа «вулкан» для визуализации результатов анализа дифференциальной экспрессии для чувствительного к засухе генотипа *Quercus robur* L. Белые и черные точки на диаграмме обозначают ДЭГ с пониженной и повышенной экспрессией, соответственно. Серые точки обозначают отсутствие дифференциальной экспрессии между образцами, подвергшимися засухе, и контрольными образцами. Отбор ДЭГ проводился при padj < 0.01 и $|\log_2 FC| \geq 1.5$.

Источник: собственная композиция авторов

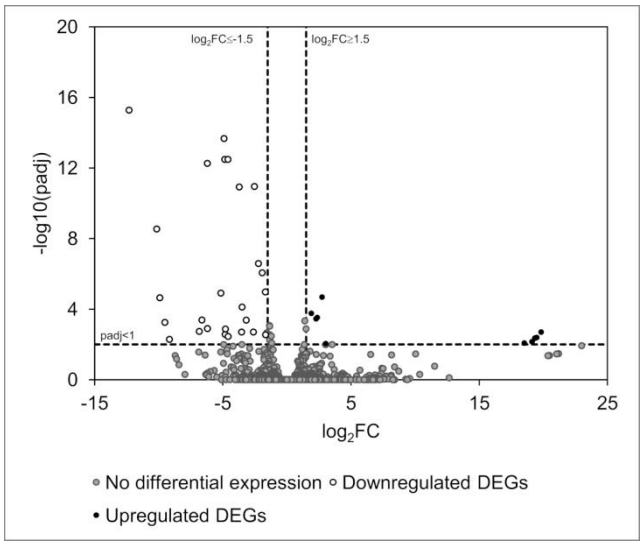


Figure 1. Volcano plot visualizing the results of differential expression analysis for the drought-sensitive genotype of *Quercus robur* L. White and black dots in the plot represent downregulated and upregulated DEGs, respectively. Gray dots indicate no differential expression between drought-stressed and control samples. DEGs were selected at padj ≤ 0.01 and $|\log_2 FC| \geq 1.5$.

Source: author's composition

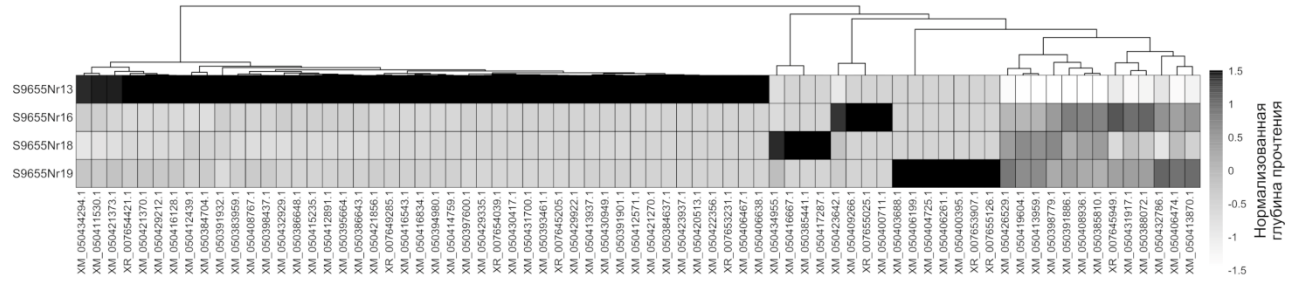


Рисунок 2. Кластеризованная тепловая карта глубин картирования ДЭГ для чувствительного к засухе генотипа *Quercus robur* L. Каждая строка тепловой карты представляет один образец, показывающий профиль экспрессии для каждого ДЭГ. Цвета на карте отображают нормализованную глубину прочтений. Кластеризация выполнялась методом k-средних.

Источник: собственная композиция авторов

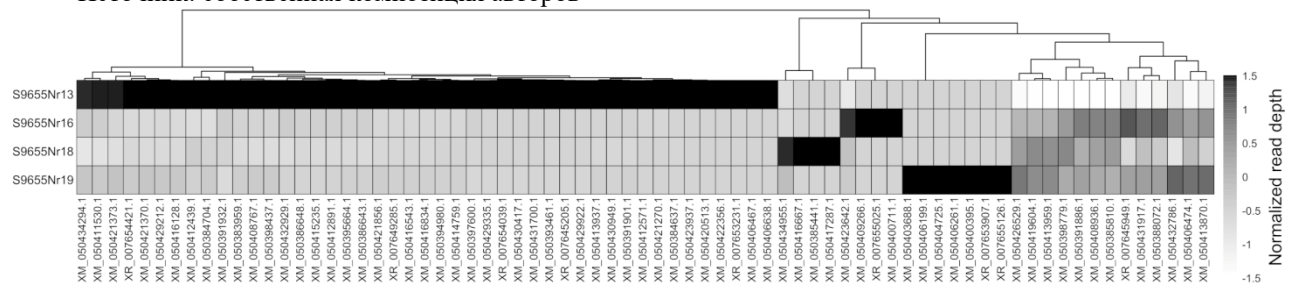


Figure 2. Clustered heatmap of DEGs mapping depths for the drought-sensitive genotype of *Quercus robur* L. Each row of the heatmap represents one sample, showing the expression profile for each DEG. Colors on the map indicate normalized read depth. Clustering was performed using the k-means method.

Source: author's composition

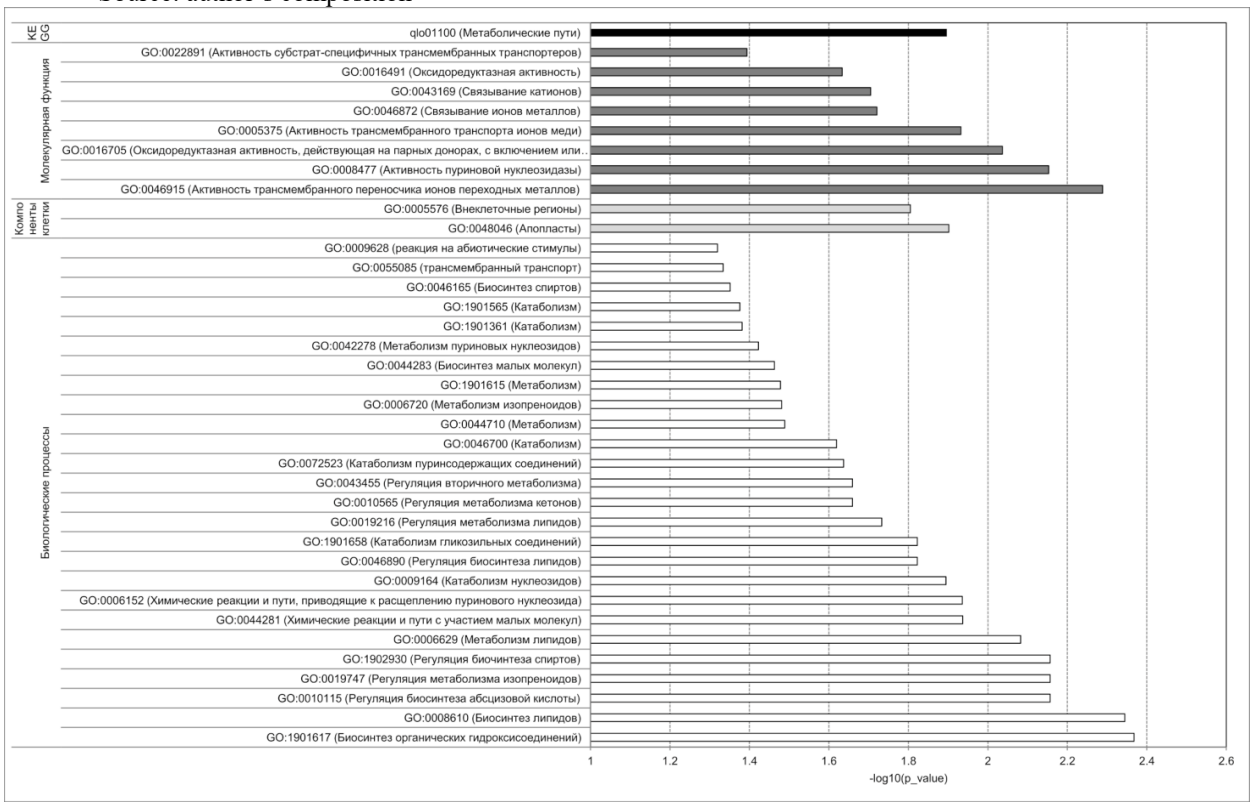


Рисунок 3. Значимые GO-термины и метаболические пути (KEGG) для ДЭГ чувствительного к засухе генотипа *Q. robur* L. Вероятность того, что конкретный путь действительно обогащен во входном наборе генов определяется p-value. Для приведенных GO-терминов p-value ≤ 0.05.

Источник: собственная композиция авторов

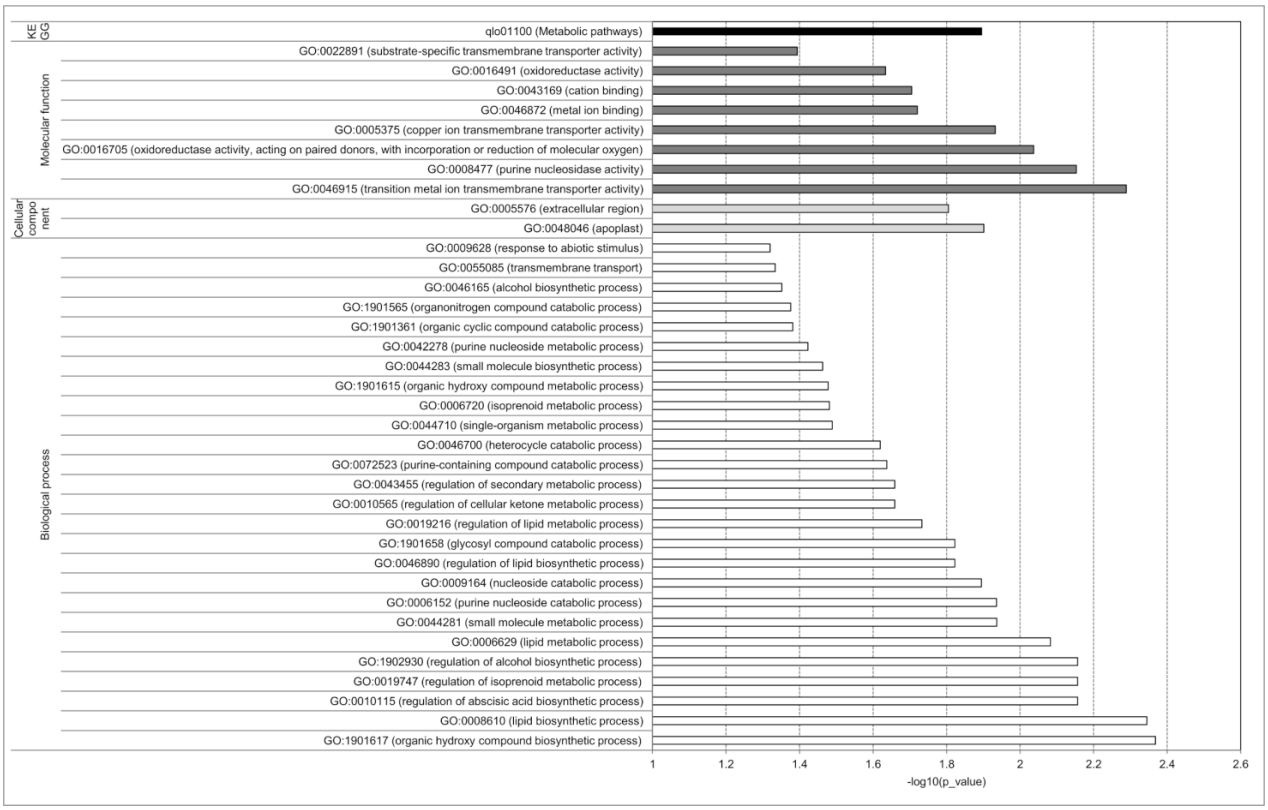


Figure 3. GO terms and metabolic pathways (KEGG) for DEGs of the drought-sensitive genotype of *Q. robur* L. The probability that a particular pathway is truly enriched in the gene set is determined by the p-value. For the given GO terms, the p-value ≤ 0.05.

Source: author's composition

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/15
УДК 630*181.5:630*231:630*561.24

Фракционный состав фитомассы и годичная продукция сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в условиях сухостепной зоны каштановых почв

Юстина Н. Поташкина[1]✉, potashkina-y@vfanc.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8846-2354
Александр В. Кошелев[1], koshelev_av@vfanc.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-4048-7549
Варвара А. Веденеева[1], vedeneeva-v@vfanc.ru https://orcid.org/0000-0002-6623-6062
Мария О. Шатровская[1], shatrovskayam@vfanc.ru https://orcid.org/0000-0002-3202-4184

[1]*ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация*

Увеличение запасов фитомассы в степных зонах может осуществляться путем проведения агролесомелиоративных мероприятий, а именно созданием искусственных защитных лесных насаждений (ЗЛН). Искусственно созданные защитные лесные насаждения выполняют важные функции в сухостепных районах, включая почвозащитную, средообразующую, водоохранную и санитарно-гигиеническую. Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.) активно используется для закрепления песков, предотвращения опустынивания и восстановления деградированных земель. Кроме того, она является эффективным поглотителем углерода, фиксируя до 2,4 т CO_2 в год, повышая при этом устойчивость экосистем к климатическим изменениям. Цель настоящей работы – оценка запасов фитомассы и годичной продукции искусственно созданных насаждений Pinus sylvestris в условиях сухостепной зоны каштановых почв с учетом возрастной динамики древостоя. Основным методом расчёта являлось аллометрическое моделирование на основе таксационных данных, полученных в результате проведения сплошной перечислительной таксации на 10 заложенных пробных площадях. Запасы фитомассы рассчитывались для фракций ствола с корой (Pst), скелета ветвей (Pbr), хвои (Pf), корней (Pr). Результаты показали, что запасы фитомассы варьируют от 29,2 т/га у молодняка 1 группы до 120,3 т/га у спелых насаждений. Доминирующей фракцией в структуре фитомассы является ствол с корой (Pbr) на долю которой приходится от 51,7 до 59,6%. Величина годичной продукции сильно зависит от возраста деревьев. Отмечено постепенное увеличение от молодняка к спелым древостоям, достигая максимальных значений при оптимальном балансе роста и физиологической устойчивости у средневозрастных насаждений и составили 3 т/га/год, минимальные значения фиксируются у молодняка 1 группы составляя 1,26 т/га/год. Полученные данные о запасах фитомассы в искусственных сосновых насаждениях могут использоваться для планирования агролесомелиоративных мероприятий и оценки их вклада в поглощение парниковых газов при разработке проектов по адаптации к изменению климата.

Ключевые слова: *запас фитомассы, сухостепная зона, годичная продукция, Pinus sylvestris, защитные лесные насаждения, таксационные характеристики*

Финансирование: Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме НИР 125021302094-5 «Формирование и функционирование адаптивных агролесомелиоративных комплексов юга России в условиях климатических изменений с использованием цифровых технологий»

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фракционный состав фитомассы и годичная продукция сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в условиях сухостепной зоны каштановых почв / Ю.Н. Поташкина, А.В. Кошелев, В.А. Веденеева, М.О. Шатровская // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 256-275. – *Библиогр.: с. 269-274 (30 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/15

Поступила 15.09.2025. ***Пересмотрена*** 25.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Fractional composition of phytomass and annual production of Scots pine (*Pinus sylvestris*) under the conditions of the dry steppe zone of chestnut soils

Yustina N. Potashkina[1]✉, potashkina-y@vfanc.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8846-2354
Aleksandr V. Koshelev[1], koshelev_av@vfanc.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-4048-7549
Varvara A. Vedeneyeva[1], vedeneeva-v@vfanc.ru https://orcid.org/0000-0002-6623-6062
Mariya O. Shatrovskaya[1], shatrovskayam@vfanc.ru https://orcid.org/0000-0002-3202-4184

[1]*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation*

Abstract

Increasing phytomass stocks in steppe zones can be achieved through agroforestry reclamation measures, specifically by establishing artificial protective forest plantations (PFPs). Artificially created protective forest plantations perform important functions in dry-steppe regions, including soil protection, environmental regulation, water conservation, and sanitary-hygienic roles. Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) is widely used for sand stabilization, preventing desertification, and restoring degraded lands. In addition, it is an effective carbon sink, sequestering up to 2.4 t of CO_2 per year, thereby enhancing ecosystem resilience to climate change. The aim of this study was to assess the phytomass stocks and annual production of artificially established Pinus sylvestris plantations in the dry-steppe zone of chestnut soils, taking into account the age dynamics of the stand. The primary calculation method was allometric modelling based on forest inventory data obtained from a complete enumeration survey conducted on 10 sample plots. Phytomass stocks were calculated for the following fractions: stem with bark (Pst), branch skeleton (Pbr), needles (Pf), and roots (Pr). The results showed that phytomass stocks ranged from 29.2 t/ha in young stands of age group I to 120.3 t/ha in mature stands. The dominant fraction in the phytomass structure is the stem with bark (Pst), accounting for 51.7–59.6% of the total. Annual production strongly depends on tree age. A gradual increase from young to mature stands was observed, reaching maximum values at an optimal balance between growth and physiological stability in middle-aged stands (3 t/ha/year), while the minimum values were recorded in age group I young stands (1.26 t/ha/year). The obtained data on phytomass stocks in artificial pine plantations can be used for planning agroforestry reclamation measures and assessing their contribution to greenhouse gas sequestration in the development of climate adaptation projects.

Keywords: *phytomass stocks, dry-steppe zone, annual production, Pinus sylvestris, shelterbelt plantations, stand characteristics*

Funding: The work was carried out within the framework of the State assignment on the topic of research 125021302094-5 "Formation and functioning of adaptive agroforestry complexes in the south of Russia in the context of climate change using digital technologies"

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Potashkina Yu. N., Koshelev A. V., Vedeneyeva V. A., Shatrovskaya M. O. (2025). Fractional composition of phytomass and annual production of Scots pine (*Pinus sylvestris*) under the conditions of the dry steppe zone of chestnut soils. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 256-275 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/15.

Received 15.09. 2025. ***Revised*** 25.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Дифференциация запасов фитомассы обуславливается различными группами факторов, такими как абиотические (почвенно-климатические, орографические), биотические и антропогенные. Для регионов России отмечается четко выраженное зональное распределение в соответствии с климатическими условиями: величина фитомассы увеличивается с севера на юг, с некоторым уменьшением в аридных зонах. Наибольшие запасы фитомассы сосредоточены в лесных сообществах, по оценкам авторов запасы фитомассы в различных типах леса варьируют от 70 т/га до 450 т/га. Наименьшие фиксируются в степной и полупустынной природных зонах. В степной зоне фитомасса формируется за счет подземных и надземных частей однолетних и многолетних трав [1, 2]. По оценкам авторов усредненный максимальный запас травянистого яруса надземной зеленой фитомассы варьирует в пределах от 70 г/м^2 в опустыненных до 310 г/м^2 в луговых степях. Запасы подземной фитомассы слабо отличаются в зависимости от типа степей и составляют 800-1400 г/м^2 [2].

Увеличение запасов фитомассы в степных зонах может осуществляться путем проведения агролесомелиоративных мероприятий, а именно созданием защитных лесных насаждений (ЗЛН) [3]. Искусственно созданные защитные лесные насаждения выполняют ряд важнейших функций в сухостепных районах, среди которых средообразующая, водоохранная, санитарно-гигиеническая [4]. В условиях территорий с малым процентом лесистости расширяется функциональное значение защитных лесных насаждений, они рассматриваются также с позиции поглотителей климатически активных газов. Отдельно стоит отметить использование массивных насаждений на песках с целью стабилизации подвижных сыпучих (незакрепленных) песков. Для данных видов работ в степной и лесостепной зонах используется *Pinus sylvestris*, отличающиеся развитой корневой системой, которая эффективно закрепляет песчаные грунты [5]. Помимо этого, сосна по данным Рослесинфорга обладает наиболее интенсивной поглощающей способностью среди хвойных древесных пород, так количество аккумулированного CO_2 достигает до 2,4 тонн в год/га [6].

Фитомасса древесных растений является следствием поглощения и трансформации углекислого газа из атмосферы, по средствам фотосинтеза. Фитомасса выступает одним из ключевых звеньев в углеродном цикле экосистем в следствие чего важным является проведения исследований по оценки запасов фитомассы древостоя в различных природных зонах. Корректная оценка фитомассы и годичной продукции необходима для получения объективных количественных показателей депонирования углерода искусственными насаждениями и последующего анализа их экологической эффективности [7, 8, 9, 10].

Если запас фитомассы рассматривается, как статическая величина и характеризует то, что накоплено к текущему моменту, то годичная продукция является динамической величиной и показывает сколько прибавилось за год. У этих двух понятий может отмечаться прямая взаимосвязь, заключающаяся в следующем: чем больше запас фитомассы, тем выше может быть абсолютная годичная продукция, так как формируется больше фотосинтезирующей поверхности, однако эта зависимость не является линейной и на определенном этапе роста продукция начинает снижаться [11, 12]. Так согласно закону убывающей

продуктивности следует, что на ранних стадиях развития древостоя (молодняки) годичная продукция растёт вместе с фитомассой. В зрелом и перестойном возрасте, несмотря на большой запас фитомассы, прирост снижается — из-за затенения, изреженности и старения деревьев. Так, сначала продукция растёт с запасом, достигает максимума, затем падает. Это отражает динамику роста леса и используется в моделях продуктивности лесных экосистем [13, 14, 15]. Цель работы – оценка запасов фитомассы и годичной продукции искусственно созданных насаждений *(Pinus sylvestris L.)* в условиях сухостепной зоны каштановых почв с учетом возрастной динамики древостоя. Выбор *Pinus sylvestris,* как объекта исследования обуславливается выраженной засухоустойчивостью и активным использованием в лесомелиоративных работах. Высокая продуктивность в стрессовых условиях дополнительно подтверждает её пригодность для исследований в сухостепной зоне.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Данная работа является эмпирическим исследованием. Объектом исследования выступает древостой сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) в сухостепной зоне каштановых почв. Предметом исследования являются количественные показатели фитомассы по фракциям (ствол с корой, скелетные ветви, хвоя и корни) и годичная продукция (годичный прирост биомассы), а также закономерности их изменения в различных возрастных классах.

Сбор данных

Исследования проводились на территории Нижневолжской станции по селекции древесных пород – филиале ФНЦ агроэкологии РАН, расположенного в Камышинском районе Волгоградской области (бывший агролесомелиоративный пункт ВНИАЛМИ). История создания пункта берет свое начало с 1894 году, в задачи которого входило выполнение работ по облесению и закреплению оврагов и проведение научно-исследовательских работ по защитному лесоразведению. В этом же году начинаются масштабные работы по облесению и закреплению песков путем посадки шелюги, позднее в 1898 г междурядьях шелюги высаживалась сосна обыкновенная. В 1902 г. участок, на котором расположен Камышинский лесомелиоративный опорный пункт, был избран песчано-овражной организацией лесного департамента в качестве одного из первых объектов укрепительных и облесительных работ на Юго-Востоке. С расширением работ по защитному лесоразведению площадь этого дендрологического участка постепенно увеличивалась. С 1990 года опорный пункт превратился в Нижневолжскую станцию по селекции древесных пород. К текущему моменту площадь сосновых насаждений составляет 100,1 га. В 2022 году на территории станции в рамках работы по Важнейшему инновационному проекту «Углерод» организован полигон интенсивного уровня типа 2 «Камышин» [5, 6].

Объект расположен в центральной части Волгоградской области в сухостепной зоне на западном берегу Волги (Волгоградского водохранилища) в пределах восточного крутого склона Приволжской возвышенности, изрезанной долиной реки Камышинки и оврагами. Поверхность территории пологоволнистая, абсолютные отметки поверхности изменяются от 85 до 140 м. Формирование рельефа возвышенности происходило под воздействием интенсивного проявления новейших тектонических поднятий и эрозионных процессов. Камышинский район относится к ступенчатым возвышенностям правобережья Волги, расположенным между реками Иловлей и Волгой. Типы почв – светло-каштановые почвы засушливых полупустынных степей. Почвообразующие породы этих почв отличаются значительным разнообразием: лессовидные суглинки, песчаники, мел, мергель, опока, древние отложения Хвалынского моря, Сыртовые глины. Это в свою очередь нашло отражение в разнообразии самих почв. По гранулометрическому составу каштановые почвы делятся: глинистые и тяжелосуглинистые (примерно 5%), среднесуглинистые (примерно 18%), легкосуглинистые (примерно 67%), супеси и песчаные (примерно 10%). По мощности гумусового горизонта они делятся на среднемощные и маломощные, но преобладающей является

разновидность маломощных. Климат района характеризуется резкой континентальностью. Среднее годовое количество осадков составляет 330 мм. В период вегетации выпадает 30% осадков от среднегодовой нормы. Абсолютный минимум температуры воздуха минус 36°С, а абсолютный максимум плюс 42,6°С. Летом испарение превышает сумму осадков почти в 3 раза. В весенний период свирепствуют суховейные ветры юго-восточного и южного направлений. Наибольшее число суховейных дней приходится на май, июнь, июль. Нередко в течение месяца число суховейных дней достигает 20. Отмечаются дни, когда относительная влажность воздуха спускается до 10%.

Сбор первичного материала для определения запасов фитомассы осуществлялся на 10 заложенных пробных площадях тестового полигона размером 50×50 м в соответствии с методическими рекомендациями (рисунок 1). Из-за мозаичного характера защитных лесных насаждений, сформированных в разные годы, в пределах каждой площадки одновременно присутствовали участки, представленные деревьями различных возрастных групп. Возрастная структура определялась на основе сплошной перечислительной таксации внутри ПП, что позволило включить в анализ весь спектр возрастных состояний и обеспечить достаточную репрезентативность данных при оценке фитомассы и годичной продукции. Определение возраста осуществлялось с применением бурава Пресслера, измерение диаметра ствола лесной мерной вилкой, высота насаждений измерялась высотомером [16, 17].

Анализ данных

Расчет запасов фитомассы осуществлялся аллометрическим методом, основу которого представляет традиционная трансконтинентальная аллометрическая модель с константами уравнений, в качестве регрессоров выступают высота и диаметр насаждения по формуле (1) [18]

$$\ln P = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln DHB$$

где P – фитомасса по фракциям, кг; H – высота дерева, м; DHB – диаметр ствола на высоте 1,3 м (см).

Коэффициенты a_0, a_1, a_2 уравнения (1) были взяты из ранее опубликованных аллометрических моделей для *Pinus*, рассчитанных на широком ареале [18–21], поскольку отсутствуют данные модели для сухостепных условий.

Прямой валидации используемой аллометрической модели на данных пробных деревьев исследуемой территории в рамках настоящего исследования к текущему моменту не проводилось. В дальнейшем планируется проведение валидации моделей на основе спила модельных деревьев с каждой пробной площадки с последующим расчётом показателей точности (RSE, R^2), что позволит уточнить достоверность полученных оценок фитомассы и годичной продукции. Фитомасса определялась для следующих фракций древостоя: ствол с корой (Pst), скелет ветвей (Pbr), фотосинтезирующие органы (хвоя) (Pf), и корни (Pr).

Для определения годичной продукции был отобран растительный материал с пробных деревьев. Годичная продукция хвои определялась путем разделения побегов и хвои на приростные годовые сечения с последующим высушиванием до постоянной массы и взвешиванием. Полученные данные использовались для расчёта годичной продукции по каждой возрастной группе и экстраполяции на гектар [16].

Сочетание прямых измерений и использование уравнения позволяет произвести точный расчет и учесть региональные особенности годичного прироста хвои древесных растений. Использовавшиеся трансконтинентальные аллометрические модели фракционной структуры фитомассы дают возможность оперативно определять фитомассу на единице площади, используя лишь данные сплошного перечёта деревьев по ступеням толщины [18, 19, 20, 21].

Для анализа полученных данных использовались методы описательной и многомерной статистики. Для выявления сходства и различий между исследуемыми объектами дополнительно был проведён кластерный анализ, что позволило выделить группы с близкими статистическими параметрами и установить закономерности в распределении признаков.

Кластерный анализ был использован в качестве дополнительного инструмента для проверки структурной однородности древостоев и выявления скрытых группировок в данных, не основанных напрямую на принятых возрастных категориях.

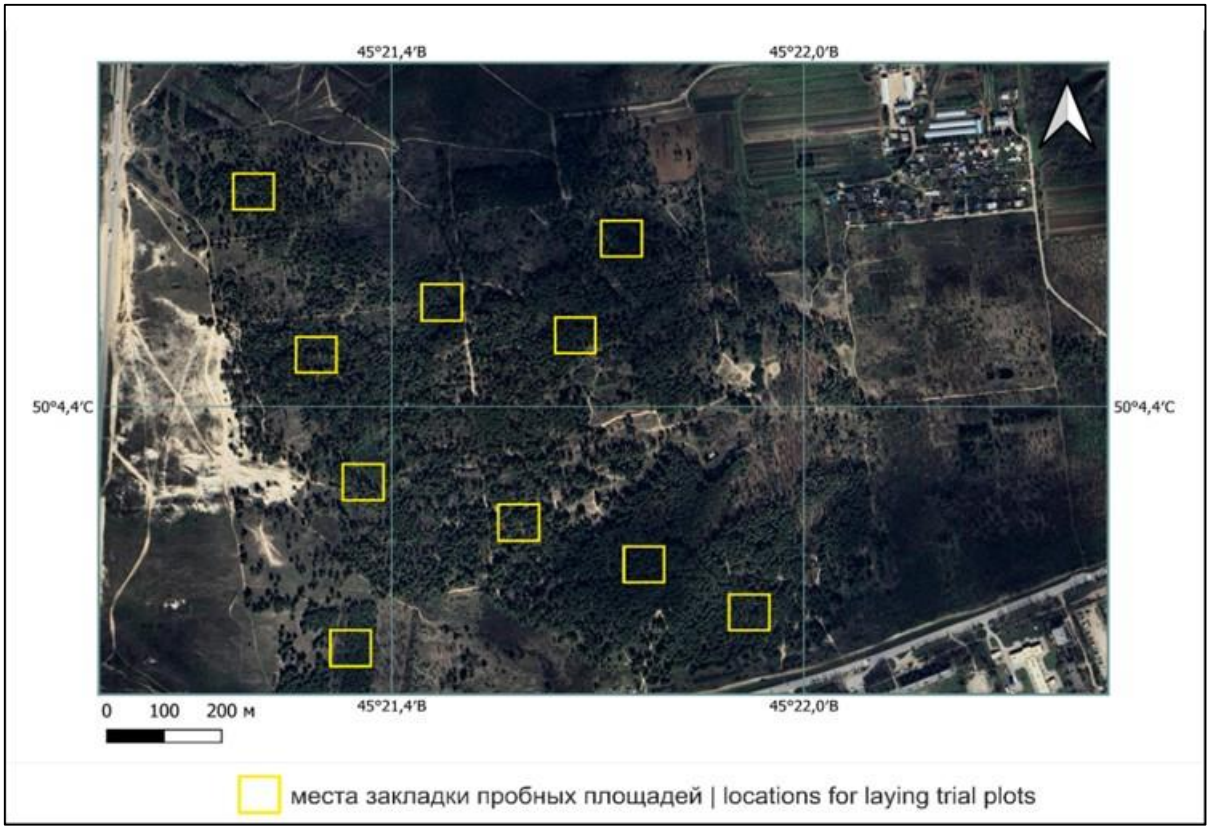


Рисунок 1. Расположение пробных площадей на тестовом полигоне
Figure 1. Location of test areas on the test site
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Статистическая обработка данных и кластерный анализ проводились с использованием языка программирования Python (библиотеки pandas, scikit-learn, scipy, matplotlib, seaborn) и программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

В условиях сухостепных зон, подвергшихся агролесомелиоративному обустройству, наибольший запас фитомассы сконцентрирован в искусственно созданных лесных насаждениях [3, 4]. В процессе проведения работ были обследованы ЗЛН на 10 заложенных пробных площадях. Отмечены следующие особенности возрастной структуру древостоя: на территории зафиксировано наличие различных возрастных классов насаждений (*Pinus sylvestris L.*) от молодняков до спелых, максимальный возраст которых достигает 101 год. На ряде пробных площадей, расположенных в северо-

западной части исследуемого участка, отмечается обильное наличие подроста, густота которого достигает 18 тыс.шт/га. Ярус живого напочвенного покрова характеризуется выраженной пространственной неоднородностью, что

проявляется в варьировании его проективного покрытия, запаса и видового состава на различных участках исследуемой территории. В структуре фитоценоза отмечено следующее: на пробных площадях с большим количеством подроста зафиксировано малое количество живого напочвенного покрова и напротив на участках с обильным живым напочвенным покровом малое количество подроста, что обусловливается рядом факторов. Так, густой подрост формирует плотный подполог, снижающий уровень освещённости и изменяющий микроклиматические условия на уровне почвы. Это ограничивает развитие живого напочвенного покрова, особенно светолюбивых видов трав. В то же время, обильный травянистый покров может препятствовать прорастанию и укоренению древесных всходов, создавая конкуренцию за ресурсы и физически ограничивая пространство. На пробных площадях, расположенных преимущественно по краям лесного массива обнаружены крупные древесные остатки (КДО), что свидетельствует о воздействии экстремальных
метеорологических факторов, таких как сильные ветровалы [5, 22].

Вертикальная структура фитоценоза включает древесный ярус, ярус подроста, подлеска и живой напочвенный покров. Доминантом в структуре фитоценоза является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris L.*), формирующая полог древостоя. Так же встречается дуб черешчатый (*Quercus robur*), тополь дрожащий (*Populus tremula*), робиния псевдоакация (*Robinia pseudoacacia*). Зафиксирован обильный подрост сосны, густота которого колеблется в пределах от 5,1 до 18 тыс. шт./га. К подросту относили насаждения возрастом до 5 лет, средняя высота которых составляет 1,5-2 м. Отмечено наличие древостоя различных возрастных классов для хвойных (молодняки, средневозрастные, приспевающие, спелые), таксационные характеристики древостоя различных возрастных групп приведены в таблицах 1,2.

Таблица 1

Морфометрические характеристики древостоя

Table 1

Morphometric characteristics of tree stands

Возрастные группы хвойных деревьев | Age groups of coniferous trees	Возраст древостоя | лет Age of tree stand, y ears	Высота, м | Height, m	Диаметр, см | Diameter, cm	Запас, $м^3$ /га | Growing stock, $m^3\ ha^{-1}$	Класс бонитета | Capacity class	Густота, шт/га | Density, pcs/ha
Молодняки (1-я группа) | Young stands, (group 1)	15-20	6,9±0,7	14,5±2,5	80,1	IV	800
Молодняки (2-я группа) | Young stands, (group 2)	20-40	10,8±1,1	21,8±3,1	201,5	III	500
Средневозрастные (3-я группа) | Middle-aged stands (group 3)	40-60	14,1±0,5	28,6±5,8	362,3	III	400
Приспевающие (4-я группа) | Maturing stands (group 4)	60-80	17,5±1,2	32,9±2,9	446,3	III	300
Спелые (5-я группа) | Mature stands (group 5)	80-100	20,6±1	40,3±4,3	525,5	III	200

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Таблица 2

Статистические показатели высоты и диаметра древостоя

Table 2

Statistical indicators of height and diameter of tree stand

Статистические характеристики | Statistical parameters	Молодняки (1-я группа) | Young stands, (group 1)		Молодняки (2-я группа) | Young stands, (group 2)		Средневозрастные (3-я группа) | Middle-aged stands		Приспевающие (4-я группа) | Maturing stands		Спелые (5-я группа) | Mature stands	
	h	d	h	d	h	d	h	d	h	d
Размер выборки, шт. | Sample size, pcs.	54	54	51	51	35	35	44	44	30	30
Минимум | Minimum	5,1	9,5	8,6	18	12	18	15,9	29,8	18,1	35
Максимум | Maximum	9,1	18	13	26,5	15	35	21,3	40	22,2	47
Мода | Moda	6,9	12,5 15,8	9,6	18	14,5	28,5	17,3	31,4	19,9	39
Медиана | Median	6,9	14,1	10,7	20	14,2	29	17,3	32	20,4	39,7
Среднее | Mean	7	14,1	10,7	21,6	14	28,3	17,5	32,9	20,6	40
Нижний квартиль (Q1) | Lower quartile (Q1)	6,4	12,5	9,85	18	13,8	27,2	16,9	31,4	19,9	37,3
Верхний квартиль (Q3) | Upper quartile (Q3)	7,5	15,6	11,5	26,5	14,5	30,5	18	34	21,4	42,5
Межквартильный размах | Interquartile range	1,1	3,1	1,65	8,5	0,7	3,3	1,1	2,6	1,5	5,2
Стандартное отклонение | Standard deviation	1,7	2	1,09	3,6	0,6	2,8	1	2,2	0,9	2,8
Коэффициент вариации | Coefficient of variation	11,1	14,1	10,1	17	4,3	10	5,8	6,6	4,5	7
Стандартная ошибка | Standard error	0,105	0,27	0,15	0,51	0,10	0,48	0,15	0,33	0,17	0,52
Дисперсия выборки | Sample variance	0,59	3,96	1,18	13,4	0,37	8,13	1,04	4,74	0,89	7,97
Асимметрия | Asymmetry	0,33	0,78	0,03	0,12	-0,78	-0,87	0,84	1,33	-0,24	0,46
Эксцесс | Excess	0,42	0,65	-0,35	-1,26	0,25	0,58	0,65	1,95	-0,71	-0,29

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Ярус подлеска слабо развит и сформирован караганой древовидной (*Caragana arborescens*), сиренью обыкновенной (*Syringa vulgaris*), смородиной золотистой (*Ribes aureum*), ракитником русским (*Chamaecytisus ruthenicus*). Доминантами живого напочвенного покрова являются следующие виды травянистых растений: Полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), Вейник наземный

(*Calamagrostis epigeios),* Синеголовник полевой (*Eryngium campestre*), Мятлик узколистный (*Poa angustifolia),* Мятлик луговой (*Poa pratensis*), Латук татарский (*Lactuca tatarica*), Житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum),* Тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium),* Ковыль Лессинга (*Stipa lessingiana*), Овсяница валлисская (*Festuca valesiaca*).

На основании полученных данных по высоте и диаметру деревьев был выполнен кластерный анализ (рисунок 2) с помощью алгоритма KMeans (k=3), позволивший выделить структурно однородные группы насаждений. В качестве входных переменных использовались таксационные параметры — высота и диаметр. Перед кластеризацией данные были стандартизированы (z-преобразование) с целью устранения масштабных различий между переменными.

Оптимальное количество кластеров определялось с применением метода локтя, основанного на графическом анализе зависимости внутрикластерной суммы квадратов от числа кластеров. По результатам данного анализа было выбрано значение k = 3, обеспечивающее достаточную дифференциацию групп при минимальных потерях внутригрупповой однородности.

В результате кластеризации были выделены три статистически различающиеся группы объектов (кластер 0, кластер 1, кластер 2), характеризующиеся различными средними значениями высоты и диаметра. Так, к кластеру 0 – отнесены насаждения с самыми большими значениями, центр кластера имеет следующие значения: высота 20,08 диаметр 38,99 в исходных единицах. К кластеру 1 отнесены насаждения с минимальными значениями, имеющимся в массиве данных, центр кластера: высота 8,15 диаметр, 15,8 в исходных единицах. Кластер 2 – это средние значения по массиву данных, центр которых отмечен в значениях 14,67 по высоте и 29,1 по диаметру в исходных единицах. Полученные кластеры интерпретируются как условные типы деревьев, отличающиеся морфометрическими характеристиками.

Следует отметить, что результаты кластерного анализа (k = 3), определённые методом “локтя”, не полностью совпадают с выделенными возрастными группами (n = 5). Это объясняется тем, что многомерная кластеризация группирует древостои не по формальным возрастным категориям, а по фактическому сходству совокупности таксационных параметров и биомассовых характеристик. В рамках кластеров 1 и 2 объединяются соответственно молодняки I–II групп и средневозрастные древостои, которые демонстрируют близкие структурные показатели. Третий кластер представлен приспевающими и спелыми насаждениями, отличающимися более высокими значениями запаса фитомассы и годичной продукции. Таким образом, кластеризация выявила укрупнённые структурные паттерны, подтверждающие, что пять возрастных классов фактически формируют три функционально сходных группы, что усиливает интерпретацию возрастной динамики

Таксационные данные послужили основой для проведения расчетов запасов фитомассы и годичной продукции для древостоя Pinus sylvestris различных возрастных классов (таблица 3, рисунок 3).

Так, согласно полученным расчетам, отмечается увеличение фитомассы одного дерева с увеличением возраста древостоя от 36,5 кг у молодняков 1 группы до 601,5 кг у спелых насаждений. В пересчете на гектар, не смотря на снижение густоты древостоя, наблюдается схожая ситуация, фитомасса увеличивается от 29,2 т/га до 120,3 т/га.

При этом на группу спелых насаждений приходится максимальное значение запаса фитомассы, что является следствием накопления органического вещества фитомассы не смотря на уменьшение густоты. Полученные значения запасов фитомассы для спелых насаждений (120,3 т/га) находятся в пределах, характерных для сосновых культур сухостепной зоны, однако заметно ниже, чем максимальные показатели, отмечаемые в более благоприятных условиях произрастания. По данным исследований, в южнотаёжных и лесостепных регионах, где сосна растёт при более высоком

увлажнении и на глубоких суглинистых почвах, запасы фитомассы спелых древостоев могут достигать 150–200 т/га, а в отдельных высокопродуктивных участках — до 220–250 т/га. Таким образом, различие почти в 1,5–2 раза по сравнению с оптимальными условиями подчёркивает выраженное влияние аридного климата, песчаных почв и ограниченного водного режима на продуктивность сосновых насаждений в сухостепной зоне. Полученные результаты отражают характерный для засушливых экосистем сдерживающий эффект дефицита влаги на накопление биомассы, даже при достижении насаждениями спелого возраста.

В структуре фитомассы на всех этапах онтогенеза доминировала фракция ствола с корой (Pst), доля которой увеличивалась с возрастом от 51,7 до 59,6%. Доля скелетных ветвей (Pbr), хвои (Pf) и корней (Pr) демонстрировала умеренное снижение или стабилизацию в относительном выражении, при устойчивом росте абсолютных значений. Особенно отчётливо это наблюдалось в группах зрелых и приспевающих насаждений. Запас фитомассы в фракции корни стабильно составляет порядка 19-23% с незначительным ростом в спелых древостоях. На графике (рисунке 3) отмечается увеличение запаса фитомассы с возрастом, особенно ярко это выражено в фракции ствол с корой и корни, фракция хвои достигает плато и почти не увеличивается после достижения среднего возраста древостоя [23, 24].

Отмечается перераспределение фитомассы в сторону фракций ствол с корой и корни в связи с старением древостоя, что указывает на переход от роста к накоплению устойчивой биомассы. Относительная доля хвои и ветвей уменьшается, несмотря на рост их абсолютных запасов. Оптимальная плотность для суммарного накопления массы наблюдается в средневозрастных и приспевающих насаждениях

Таким образом, структура фитомассы отражает переход от активного роста к стабилизации накопленных органических ресурсов, с доминированием стволовой фракции у более зрелых деревьев. Уменьшение плотности древостоя компенсируется ростом массы отдельных деревьев, обеспечивая общее увеличение запаса на гектар. У приспевающих древостоев наблюдается умеренное снижение до 2,24 т/га, что может быть связано с началом процессов старения, уменьшением прироста в высоту и перераспределением ресурсов на поддержание физиологической устойчивости. Отмечено различия между индивидуальной продукцией деревьев и продукцией насаждения в целом, что обусловлено изменением густоты древостоя по мере его развития. Несмотря на то, что спелые насаждения характеризуются максимальной годичной продукцией на одно дерево (14,4 кг/дер.), их суммарная продукция на гектар составляет 2,88 т/га/год, что ниже, чем у средневозрастных насаждений (3,0 т/га/год при индивидуальной продукции 7,74 кг/дер.).

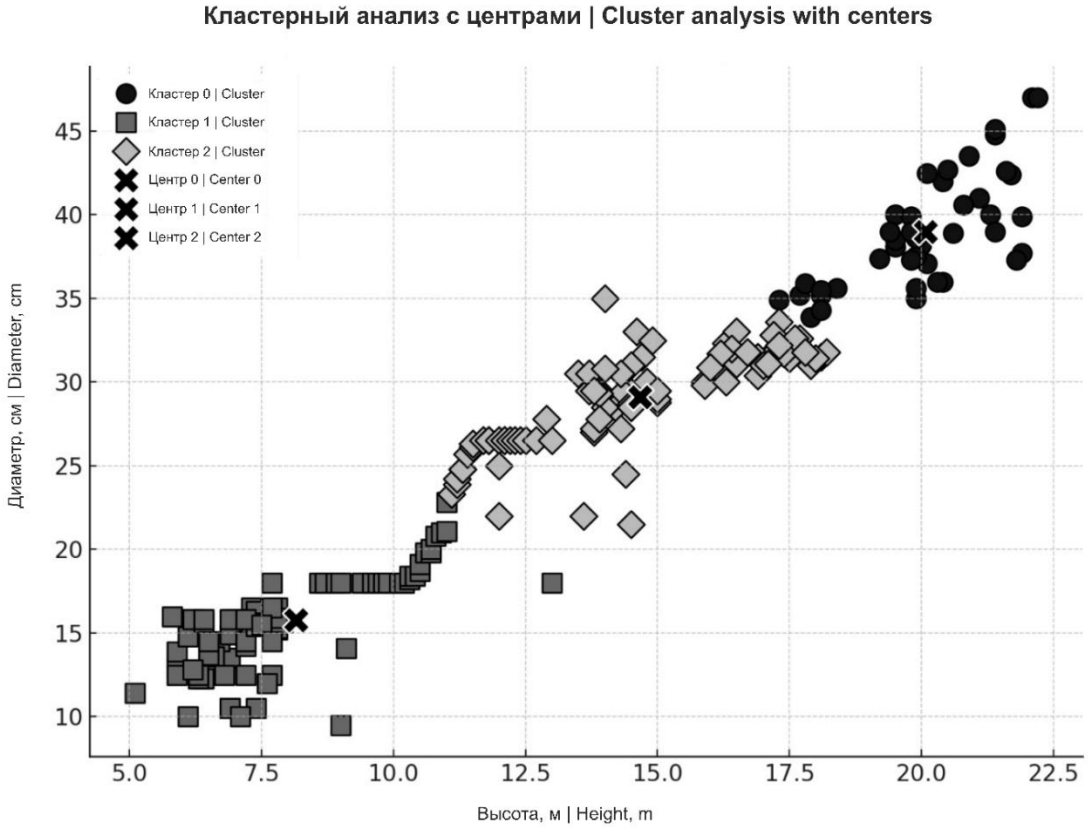


Рисунок 2. Результаты кластерного анализа по таксационным показателям
Figure 2. Results of cluster analysis for taxation indicators
Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 3

Фракционная структура фитомассы и годичная продукция древостоя различных возрастных классов

Table 3

Fractional structure of phytomass and annual production of forest stands of different age classes

Возрастные группы древостоя | Age classes of forest stands	Запас фитомассы по фракциям Phytomass reserves by fractions								Годичная продукция	
	P*st*		P*br*		P*f*		P*r*			
	на дерево, кг | for each tree, kg	на га, т | per ha, t	на дерево, кг | for each tree, kg	на га, т | per ha, t	на дерево, кг | for each tree, kg	на га, т | per ha, t	на дерево, кг | for each tree, kg	на га, т | per ha, t	на дерево, кг | for each tree, kg	на га, т | per ha, t
Молодняки (1-я группа) | Young stands, (group 1)	18,9	15,1	6,1	4,9	4,5	3,6	7	5,6	1,57	1,26
Молодняки (2-я группа) | Young stands, (group 2)	64,5	32,3	17,4	8,7	10,2	5,1	24,4	12,2	4,08	2,04

Средневозрастные (3-я группа) | Middle-aged stands (group 3)	132,5	53	32,8	13,1	17,2	6,9	50,6	20,3	7,74	3
Приспевающие (4-я группа) | Maturing stands (group 4)	216,9	65	44,7	13,4	21,3	6,4	81,3	24,4	7,45	2,24
Спелые (5-я группа) | Mature stands (group 5)	358,6	71,7	73,5	14,7	32	6,4	137,4	27,5	14,4	2,88

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

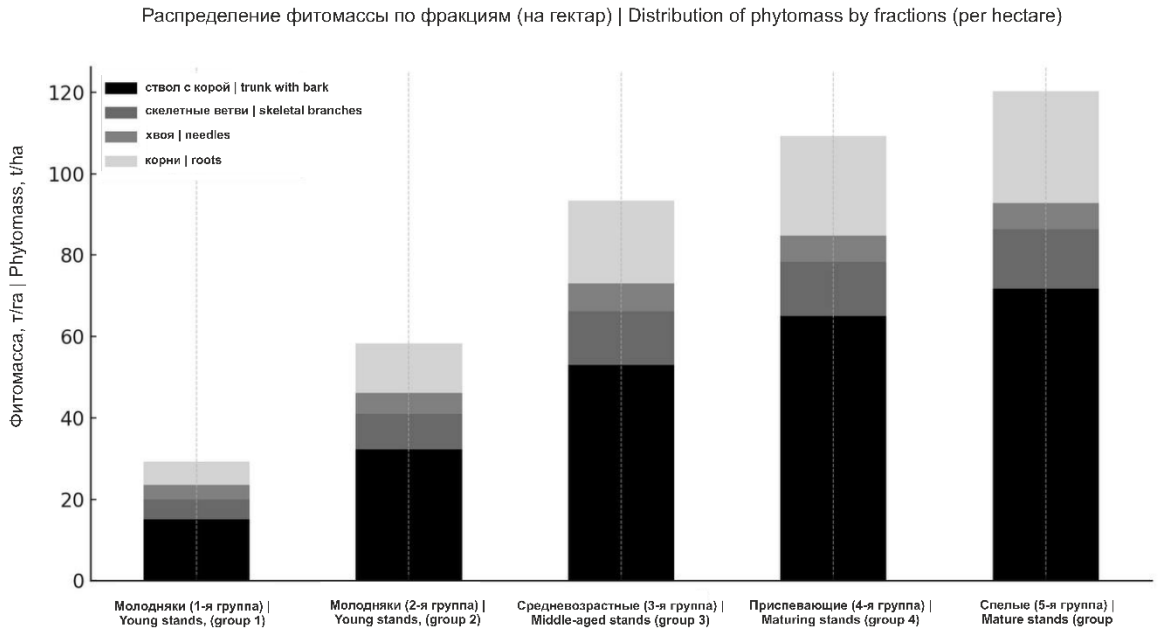


Рисунок 3. Структура фитомассы по возрастным классам древостоя
Figure 3. Structure of phytomass by age classes of forest stand
Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Такой эффект обусловлен более низкой густотой спелых древостоев (200 шт/га) по сравнению со средневозрастными (400 шт/га). Таким образом, пик продуктивности экосистемного уровня приходится на средневозрастные насаждения, где оптимально сочетаются относительно высокая индивидуальная продукция и ещё достаточно высокая плотность древостоя. Интересн400ым является также то, что продукция спелых насаждений оказалась выше, чем у приспевающих (2,24 т/га/год при густоте 300 шт/га), несмотря на меньшую плотность древостоя. Это может быть связано с более выраженным диаметральным приростом и увеличением массы хвои у старших деревьев, которые в благоприятных условиях способны поддерживать высокий уровень физиологической активности. Дополнительным фактором может быть пространственная структура

конкретного древостоя: более редкое размещение крон у спелых деревьев снижает внутривидовую конкуренцию за свет и ресурсы, что способствует сохранению значительного индивидуального прироста даже на поздних этапах онтогенеза [25, 26].

Полученные данные подтверждают закономерное увеличение запасов фитомассы с возрастом древостоя, при этом наибольший вклад в суммарную биомассу на всех этапах развития вносит фракция ствола с корой (Pst). Доля хвои (Pf) и скелетных ветвей (Pbr) снижается в относительном выражении, что согласуется с результатами Tsepordey [27] и Wirth et al. [24], указывающими на морфофункциональную перестройку кроны и перераспределение ресурсов в сторону стволовой и корневой биомассы по мере старения насаждений. Умеренное снижение годичной продукции в приспевающих и спелых группах может быть связано с физиологическим торможением прироста, что также описано в работах Ryan et al. (1996) [25, 27, 28, 29, 30].

Заключение

Фитоценоз представляет собой разновозрастные защитные насаждения сосны обыкновенной (Pinus sylvestris L.), искусственного происхождения. Насаждение сформировано в результате целенаправленного лесоразведения, характеризуется мозаичной возрастной структурой, включающей молодняки, средневозрастные, приспевающие и спелые деревья. Проведённый анализ, основанный на использовании аллометрического моделирования для количественной оценки фитомассы и годичной продукции древостоев Pinus sylvestris L. с применением данных сплошной перечислительной таксации, даёт возможность сформулировать ряд ключевых выводов:

1.Запасы фитомассы и годичная продукция сосновых насаждений увеличиваются с возрастом дерева, при этом индивидуальная продукция достигает максимума у спелых деревьев, а продукция на гектар максимальна у средневозрастных древостоев за счёт более высокой густоты.

2. Запасы фитомассы спелых насаждений сухостепной зоны (120,3 т/га) ниже, чем в оптимальных условиях произрастания, что подчёркивает ограничивающее влияние аридного климата, песчаных почв и дефицита влаги на продуктивность сосновых культур.

3. С возрастом древостоя наблюдается перераспределение фитомассы в сторону ствола с корой и корней, что отражает переход от активного роста к накоплению стабильной биомассы, при этом общий запас на гектар увеличивается за счёт роста массы отдельных деревьев, несмотря на снижение густоты.

4. Годичная продукция сосновых насаждений возрастает с 1,26 т/га у молодняков 1 группы до максимума на уровне экосистемы 3,0 т/га у средневозрастных деревьев (индивидуальная продукция 7,74 кг/дер.), после чего снижается до 2,24 т/га у приспевающих и 2,88 т/га у спелых древостоев (индивидуальная продукция 14,4 кг/дер.), что отражает сочетание роста массы отдельных деревьев и уменьшения густоты древостоя.

Искусственно созданные защитные насаждения сосны, изначально предназначенные для закрепления песков, показывают высокие запасы фитомассы и стабильную годичную продукцию. Это делает их ценными не только для борьбы с опустыниванием, но и для использования в качестве эффективных поглотителей климатически активных газов, что расширяет их практическое применение в управлении экосистемами и климатической политике.

Перспективным направлением является проведение валидации аллометрических моделей на основе прямых измерений отдельных деревьев для уточнения точности оценок фитомассы и годичной продукции. Также перспективным является интеграция данных по фитомассе и годичной продукции в модели углеродного баланса для оценки климатической функции насаждений.

Список литературы

1. Абатуров Б.Д. Сравнительная продуктивность лесных и травяных экосистем // Вестник Российской академии наук. – 2023. – 2. – С. 162-170. – DOI: 10.31857/S0869587323020020. – URL: https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=vestnik&year=2023&vol=93&iss=2&file=Vestnik2302002Abaturov.pdf.
2. Титлянова А.А., Вишнякова Е.К., Смоленцева Е.Н. Чистая первичная продукция степных экосистем и причины ее пространственной изменчивости // Почвоведение. – 2024. – 3. – С. 428-438. – DOI 10.31857/S0032180X24030046. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69153623.
3. Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачёва А.М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. – 2023. – 1(94). – С. 4-14. – DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54316543_32431008.pdf.
4. Сорокина О.А., Влияние искусственных древесно-кустарниковых насаждений на биологическую активность почв в степях Хакасии // Лесоведение. – 2023. – 1. – С. 77-84. – DOI: 10.31857/S0024114823010096. – URL: https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2023&vol=2023&iss=1&file=LesVed2301009Sorokina.pdf.
5. Кузенко А. Н., Кошелев А.В. Исторический аспект формирования защитных лесных насаждений из сосны обыкновенной в Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – 1(79). – С. 227-234. – DOI 10.32786/2071-9485-2025-01-23. – EDN YDQGDS. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=82275252.
6. Рослесинфорг: [официальный сайт]. URL: https://roslesinforg.ru/ (дата обращения: 08.08.2025). – Текст: электронный.
7. Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Липка О.Н. Потенциальное углерода фитомассой древостоя при восстановлении тугайных лесов // Лесоведение. – 2020. – 2. – С. 115-126. – DOI: 10.31857/S0024114820020114. – URL: https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2020&vol=2020&iss=2&file=LesVed2002011Zamolodchikov.pdf.
8. Осипов А.Ф., Кутявин И.Н., Манов А.В., Кузнецов М.А., Бобкова К.С. Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – 4. – С. 25-38. – DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-25-38. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49168688.
9. Нагимов З.Я., Суслов А.В., Коломенцева Ю.С. Оценка фитомассы сосновых древостоев на пробных площадях государственной инвентаризации лесов (на примере лесопарков Екатеринбурга) // Леса России и хозяйство в них. – 2023. – 4(87). – С. 47-54. – DOI 10.51318/FRET.2023.87.4.004. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=58800418.
10. Пеккоев А.Н., Мошников С.А., Ромашкин И.В., Тесля Д.В. Запасы углерода в фитомассе древесных растений и крупных древесных остатках в старовозрастных сосняках черничных заповедника «Кивач» // Вопросы лесной науки. – 2024. – 7(4). – С. 62-89. – DOI: 10.31509/2658-607x-202474-156. – URL: https://jfsi.ru/7-4-2024-pekkoev_et_al/.
11. Усольцев В.А., Плюха Н.И., Цепордей И.С. Региональные особенности содержания сухого вещества во фракциях фитомассы деревьев сосны обыкновенной // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2024. – 3(63). – С. 6-19. – DOI 10.25686/2306-2827.2024.3.6. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=74963116.
12. Ромашкин И.В., Геникова Н.В., Крышень А.М., Мошников С.А., Поликарпова Н.В. Зависимость радиального прироста Pinus sylvestris (Pinaceae) от метеорологических условий и аэротехногенного загрязнения на северо-западе Мурманской области // Растительные ресурсы. – 2023. – 59(1). – С. 76-92. – DOI 10.31857/S0033994623010089. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=53987083.

13. Иванов В.П., Марченко С.И., Нартов Д.И., Балухта Л.П. Влияние климатических факторов на радиальный прирост Pinus sylvestris и Picea abies (Pinaceae) на территории Брянской области // Растительные ресурсы. – 2021. – 57 (1). – С. 39-48. – DOI 10.31857/S0033994621010052. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44769012.
14. Лебедев А.В. Динамическая модель роста сосновых древостоев Европейской части России по данным повторных наблюдений // Сибирский лесной журнал. – 2024. – 4. – С. 72-83. – DOI 10.15372/SJFS20240407. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=73951888.
15. Рогозин М.В. Пять основных законов в развитии древостоев. Научное обозрение // Биологические науки. – 2019. – 3. – С. 32-36. – URL: https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1158.
16. Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг» / Консорциум Ритм углерода. – 2023. – 32 с. // РИТМ углерода: [официальный сайт]. – URL: https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-polevyh-rabot-po-taksaczii-na-ppp_27_06_2023-.pdf (дата обращения: 15.08.2025). Текст: электронный.
17. Методология реализации климатического проекта «Увеличение накопления углерода в сельскохозяйственных почвах по результатам агролесомелиорации и агрофитомелиорации» / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. – 2023. – 43 с. // Реестр углеродных единиц: [официальный сайт]. – URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/Методика_агромелиорация_чист.pdf (дата обращения: 15.08.2025). Текст: электронный.
18. Усольцев В.А. Моделирование фитомассы корней деревьев и древостоев Евразии по материалам баз данных // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2024. – 4. – С. 4-17. – DOI 10.21178/2079-6080.2024.4.4. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80289552.
19. Тюкавина, О.Н., Клевцов Д.Н., Неверов Н.А. Аллометрические закономерности изменения надземной фитомассы культур сосны // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. Филиппова. – 2023. – 3(72). – С. 121-127. – DOI 10.34655/bgsha.2023.72.3.014. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54666323.
20. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Климатически обусловленные территориальные изменения фитомассы деревьев лесообразующих видов Евразии и их прогнозирование // Сибирский лесной журнал. – 2021. – 6. – С. 72-90. – DOI: 10.15372/SJFS20210607. – URL: https://сибирскийлеснойжурнал.рф/articles/usoltsev-v-a-tsepordey-i-s-klimaticheski-obuslovlennye-territorialnye-izmeneniya-fitomassy-derevev-l/.
21. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. – 2022. – 1(80). – С. 4-14. – DOI 10.51318/FRET.2022.85.72.001. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48615093.
22. Сурхаев И.Г, Сурхаев Г.А., Рыбашлыкова Л.П. Рост и долголетие хвойных культур в экотопах песков Терско-Кумского междуречья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – 4(60). – С. 182-192. – DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-17. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44450748_85736672.pdf.
23. Новичонок Е.В., Галибина Н.А., Никерова К.М. Распределение фитомассы и содержание азота и углерода в хвое сосны обыкновенной в средней тайге республики Карелия // Вопросы лесной науки. – 2025. – 8(1). – С. 1-27. – DOI: 10.31509/2658-607x-202581-162. – URL: https://jfsi.ru/wp-content/uploads/2025/04/8-1-2025-%20Novichonok_et_al.pdf.
24. Uri V., Kukumägi M., Aosaar J., Varik M., Becker H., Aun K., Lõhmus K., Soosaar K., Uri M., Buht M., Sepaste A., Padari A. The dynamics of the carbon storage and fluxes in Scots pine (Pinus sylvestris) chronosequence. Science of the Total Environment. 2022; 844. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156847. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35007591/.
25. Liziniewicz M., Almqvist C., Helmersson A., Holmström A., Theodor L. LiDAR-estimated height in a young Scots pine (Pinus sylvestris L.) genetic trial supports high-accuracy early selection for height. Annals of Forest Science.

2025; 82(1): 1-13. DOI: 10.1186/s13595-025-01283-w. Available from: https://hal.science/hal-05002506v1/document.

26. Chen B., Liu S., Yu J., Huang Y., Yu S., Liu H., Zhang T., Liu X., Jin G., Chen W., He X. Stand biomass of Pinus sylvestris var. mongolica plantations benefits from high density monocultures in the boreal zone. Forest Ecosystems. 2024; 11(5): 100222. DOI: 10.1016/j.fecs.2024.1002 Available from: https://www.sciopen.com/article/pdf/10.1016/j.fecs.2024.100222.pdf?ifPreview=0.
27. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Age-Related Changes in the Ratios of the Components of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia. Contemporary Problems of Ecology. 2025; 17: 949-959. DOI: 10.1134/S1995425524700847. – URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S1995425524700847#citeas.
28. Pretzsch H., Heym M., Hilmers T., Bravo-Oviedo A., Ahmed Sh. Mortality reduces overyielding in mixed Scots pine and European beech stands along a precipitation gradient in Europe. Forest Ecology and Management. 2023; 539: 121008. DOI: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112723002426. Available from: https://pub.epsilon.slu.se/31251/1/pretzsch-h-et-al-20230720.pdf.
29. Assefa, S., Ventura, M., Bravo, F. Pure and mixed Scots pine forests showed divergent responses to climate variation and increased intrinsic water use efficiency across a European-wide climate gradient. European Journal of Forest Research. 2025; 144: 875-892. DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-024-01731-8. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-024-01731-8.
30. Hu M., Lehtonen A., Minunno Fr., Mäkelä A. Age effect on tree structure and biomass allocation in Scots pine (Pinus sylvestris L.) and Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.). Annals of Forest Science. 2020; 90. DOI: 10.1007/s13595-020-00988-4. Available from: https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-020-00988-4#citeas.

References

1. Abaturov B.D. Sravnitelnaya produktivnost lesnykh i travyanykh ekosistem. [Comparative productivity of forest and grassland ecosystems]. Vestnik rossiyskoy akademii nauk. 2023; 2: 162-170. (in Russ.). DOI: 110.31857/S0869587323020020. URL: https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=vestnik&year=2023&vol=93&iss=2&file=Vestnik2302002Abaturov.pdf.
2. Titlyanova A.A., Vishnyakova E.K., Smolentseva E.N. Chistaya pervichnaya produktsiya stepnykh ekosistem i prichiny eye prostranstvennoy izmenchivosti. [Net primary production of steppe ecosystems and the causes of its spatial variability]. Pochvovedeniye. 2024; 3: 428-438. (in Russ.). DOI 10.31857/S0032180X24030046. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69153623.
3. Kulik K.N., Belyayev A.I., Pugacheva A.M. Rol zashchitnogo lesorazvedeniya v borbe s zasukhoy i opustynivaniyem agrolandshaftov. [The role of protective afforestation in combating drought and desertification of agricultural landscapes]. Aridnyye ekosistemy. 2023; 1(94): 4-14. (in Russ.). DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54316543_32431008.pdf.
4. Sorokina O.A. Vliyaniye iskusstvennykh drevesno-kustarnikovykh nasazhdeniy na biologicheskuyu aktivnost pochv v stepyakh Khakasii. [Artificial Forest Stands' Impact on Soils' Biological Activity in Khakassian Steppes]. Lesovedeniye. 2023; 1: 77-84. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114823010096. DOI: 10.31857/S0024114823010096.
   URL: https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2023&vol=2023&iss=1&file=LesVed2301009Sorokina.pdf.
5. 5. Kuzenko A. N., Koshelev A.V. Istoricheskiy aspekt formirovaniya zashchitnykh lesnykh nasazhdeniy iz sosny obyknovennoy v Volgogradskoy oblasti. [The historical aspect of the formation of protective pine forests in the Volgograd region]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye. 2025; 1(79): 227-234. (in Russ.). DOI 10.32786/2071-9485-2025-01-23. – EDN YDQGDS. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=82275252.
6. Roslesinforg [Roslesinforg]. (n.d.). Retrieved August 8, 2025, from https://roslesinforg.ru/ (in Russ.).

7. Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Lipka O.N. Potentsialnoye ugleroda fitomassoy drevostoya pri vosstanovlenii tugaynykh lesov. [The Potential Absorption of Carbon by Trees' Biomass during the Restoration of Riparian Forests]. Lesovedeniye. 2020; 2: 115-126. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114820020114. URL: https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2020&vol=2020&iss=2&file=LesVed2002011Zamolodchikov.pdf.
8. Osipov A.F., Kutyavin I.N., Manov A.V., Kuznetsov M.A., Bobkova K.S. Zapasy i struktura fitomassy drevostoyev severotayezhnykh sosnyakov Respubliki Komi. [Reserves and Structure of Phytomass in Northern Taiga Pine Forest Stands in the Komi Republic]. Lesnoy Zhurnal. 2022; 4: 25-38. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-25-38. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49168688.
9. Nagimov Z.Ya., Suslov A.V., Kolomentseva Yu.S. Otsenka fitomassy sosnovykh drevostoyev na probnykh ploshchadyakh gosudarstvennoy inventarizatsii lesov (na primere lesoparkov Ekaterinburga). [Assessment of the phytomass of pine forests on test areas of the state forest inventory (using the example of Yekaterinburg forest parks)]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh. 2023; 4(87); 47-54. (in Russ.). DOI 10.51318/FRET.2023.87.4.004. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=58800418.
10. Pekkoyev A.N., Moshnikov S.A., Romashkin I.V., Teslya D.V. Zapasy ugleroda v fitomasse drevesnykh rasteniy i krupnykh drevesnykh ostatkakh v starovozrastnykh sosnyakakh chernichnykh zapovednika «Kivach». [Carbon stocks in phytomass of woody plants and coarse woody debris in old-growth blueberry pine forests in the natural reserve «Kivach»]. Voprosy lesnoy nauki. 2024; 7(4): 62-89. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-202474-156. URL: https://jfsi.ru/7-4-2024-pekkoev_et_al/.
11. Usoltsev V.A., Plyukha N.I., Tsepordey I.S. Regionalnyye osobennosti soderzhaniya sukhogo veshchestva vo fraktsiyakh fitomassy derevyev sosny obyknovennoy. [Regional characteristics of the dry matter content in the phytomass fractions of Scots pine trees]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovaniye. 2024; 3(63): 6-19. (In Russ.). DOI 10.25686/2306-2827.2024.3.6. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=74963116.
12. Romashkin I.V., Genikova N.V., Kryshen A.M., Moshnikov S.A., Polikarpova N.V. Zavisimost radialnogo prirosta Pinus sylvestris (Pinaceae) ot meteorologicheskikh usloviy i aerotekhnogennogo zagryazneniya na severo-zapade Murmanskoy oblasti. [Dependence of radial growth of Pinus sylvestris (Pinaceae) on meteorological conditions and aero-technogenic pollution in the north-west of the Murmansk region]. Rastitelnyye resursy. 2023; 59(1): 76-92. (In Russ.). DOI 10.31857/S0033994623010089. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=53987083.
13. Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Balukhta L.P. Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na radialnyy prirost Pinus sylvestris i Picea abies (Pinaceae) na territorii Bryanskoy oblasti. [Influence of climatic factors on the radial growth of Pinus sylvestris and Picea abies (Pinaceae) in the Bryansk Region]. Rastitelnyye resursy. 2021; 57 (1): 39-48. (In Russ.). DOI 10.31857/S0033994621010052. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44769012.
14. Lebedev A.V. Dinamicheskaya model rosta sosnovykh drevostoyev Evropeyskoy chasti Rossii po dannym povtornykh nablyudeniy. [Dynamic model of pine forest growth in the European part of Russia based on repeated observations]. Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2024; 4: 72-83. (In Russ.). DOI 10.15372/SJFS20240407. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=73951888.
15. Rogozin M.V. Pyat osnovnykh zakonov v razvitii drevostoyev. [Five basic laws in the development of tree stands]. Nauchnoye obozreniye. Biologicheskiye nauki. 2019; 3: 32-36. (in Russ.). URL: https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1158.
16. Methodology for field work on forest taxation at permanent test areas as part of the implementation of the innovative project of national importance "Carbon in Ecosystems: Monitoring" / Rhythms of Carbon Consortium. – 2023. – 32 p. // Rhythms of Carbon: [official website]. Registry of Carbon Units. Retrieved August 15, 2025, from Registry of Carbon Units. Retrieved August 15, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/Методика_агромелиорация_чист.pdf (in Russ.). (In Russ.).

17. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. (2023). Metodologiya realizatsii klimaticheskogo proyekta «Uvelicheniye nakopleniya ugleroda v selskokhozyaystvennykh pochvakh po rezultatam agrolesomelioratsii i agrofitomelioratsii». [Methodology for implementing the climate project "Increasing carbon accumulation in agricultural soils through agroforestry and agrophytomelioration"]. Registry of Carbon Units. Retrieved August 15, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/Методика_агромелиорация_чист.pdf (in Russ.).
18. Usoltsev V.A. Modelirovaniye fitomassy korney derevyev i drevostoyev Evrazii po materialam baz dannykh. [Modeling of the phytomass of tree roots and tree stands in Eurasia based on database materials // Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatelskogo instituta lesnogo khozyaystva. 2024; 4: 4-17. (in Russ.). DOI 10.21178/2079-6080.2024.4.4. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80289552.
19. Tyukavina. O.N., Klevtsov D.N., Neverov N.A. Allometricheskiye zakonomernosti izmeneniya nadzemnoy fitomassy kultur sosny. [Allometric patterns of changes in the above-ground phytomass of pine cultures]. Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii im. Filippova. 2023. № 3(72). 121-127. (in Russ.). DOI 10.34655/bgsha.2023.72.3.014. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54666323.
20. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Klimaticheski obuslovlennyye territorialnyye izmeneniya fitomassy derevyev lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii i ikh prognozirovaniye. [Climate-induced territorial changes in the phytomass of Eurasian forest-forming tree species and their forecasting]. Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2021. № 6. 72-90. (in Russ.). DOI: 10.15372/SJFS20210607. URL: https://sibirskiylesnoyzhurnal.rf/articles/usoltsev-v-a-tsepordey-i-s-klimaticheski-obuslovlennye-territorialnye-izmeneniya-fitomassy-derevev-l/.
21. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Noritsin D.V. Allometricheskiye modeli biomassy derevyev lesoobrazuyushchikh porod Urala. [Allometric models of the biomass of the main forest species in the Urals]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh. 2022. № 1(80). 4-14. (in Russ.). DOI 10.51318/FRET.2022.85.72.001. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48615093.
22. Surkhaev I.G., Surkhaev G.A., Rybashlykova L.P. Rost i dolgoletiye khvoynykh kultur v ekotopakh peskov Tersko-Kumskogo mezhdurechia. [Growth and longevity of coniferous crops in ecotopes of the sands of the Tersk-Kumsk interfluve]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye. 2020; 4(60): 182-192. (In Russ.). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-17. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44450748_85736672.pdf.
23. Novichonok E.V., Galibina N.A., Nikerova K.M. Raspredeleniye fitomassy i soderzhaniye azota i ugleroda v khvoye sosny obyknovennoy v sredney tayge respubliki Kareliya. [Phytomass distribution and content of nitrogen and carbon in needles of scots pine in the middle taiga in the republic of Karelia]. Voprosy lesnoy nauki. 2025; 8(1): 1-27. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-202581-162. URL: https://jfsi.ru/wp-content/uploads/2025/04/8-1-2025-%20Novichonok_et_al.pdf.
24. Uri V., Kukumägi M., Aosaar J., Varik M., Becker H., Aun K., Lõhmus K., Soosaar K., Uri M., Buht M., Sepaste A., Padari A. The dynamics of the carbon storage and fluxes in Scots pine (Pinus sylvestris) chronosequence. Science of the Total Environment. 2022; 844. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156847. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35007591/
25. Liziniewicz M., Almqvist C., Helmersson A., Holmström A., Theodor L. LiDAR-estimated height in a young Scots pine (Pinus sylvestris L.) genetic trial supports high-accuracy early selection for height. Annals of Forest Science. 2025; 82(1): 1-13. DOI: 10.1186/s13595-025-01283-w. Available from: https://hal.science/hal-05002506v1/document.
26. Chen B., Liu S., Yu J., Huang Y., Yu S., Liu H., Zhang T., Liu X., Jin G., Chen W., He X. Stand biomass of Pinus sylvestris var. mongolica plantations benefits from high density monocultures in the boreal zone. Forest Ecosystems. 2024; 11(5): 100222. DOI: 10.1016/j.fecs.2024.1002 Available from: https://www.sciopen.com/article/pdf/10.1016/j.fecs.2024.100222.pdf?ifPreview=0.

27. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Age-Related Changes in the Ratios of the Components of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia. Contemporary Problems of Ecology. 2025; 17: 949-959. DOI: 10.1134/S1995425524700847. – URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S1995425524700847#citeas.
28. Pretzsch H., Heym M., Hilmers T., Bravo-Oviedo A., Ahmed Sh. Mortality reduces overyielding in mixed Scots pine and European beech stands along a precipitation gradient in Europe. Forest Ecology and Management. 2023; 539: 121008. DOI: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112723002426. Available from: https://pub.epsilon.slu.se/31251/1/pretzsch-h-et-al-20230720.pdf.
29. Assefa, S., Ventura, M., Bravo, F. Pure and mixed Scots pine forests showed divergent responses to climate variation and increased intrinsic water use efficiency across a European-wide climate gradient. European Journal of Forest Research. 2025; 144: 875-892. DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-024-01731-8. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-024-01731-8.
30. Hu M., Lehtonen A., Minunno Fr., Mäkelä A. Age effect on tree structure and biomass allocation in Scots pine (Pinus sylvestris L.) and Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.). Annals of Forest Science. 2020; 90. DOI: 10.1007/s13595-020-00988-4 Available from: https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-020-00988-4#citeas.

Сведения об авторах

✉ *Поташкина Юстина Николаевна* – младший научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8846-2354, e-mail: potashkina-y@vfanc.ru

Кошелев Александр Валентинович – кандидат с.-х. наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4048-7549, e-mail: koshelev_av@vfanc.ru

Веденеева Варвара Александровна – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6623-6062, e-mail: vedeneeva-v@vfanc.ru

Шатровская Мария Олеговна – младший научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3202-4184, e-mail: shatrovskayam@vfanc.ru

Information about the authors

✉ *Yustina N. Potashkina* – Junior Research Fellow at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8846-2354, e-mail: potashkina-y@vfanc.ru

Aleksandr V. Koshelev – Cand. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory, Leading Researcher at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4048-7549, e-mail: koshelev_av@vfanc.ru

Varvara A. Vedeneyeva – Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6623-6062, e-mail: vedeneeva-v@vfanc.ru

Mariya O. Shatrovskaya – Junior Research Fellow at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3202-4184, e-mail: shatrovskayam@vfanc.ru

✉ – Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/16
УДК 630.182.5:630.114.3

Динамика древесного опада в лесостепной зоне Воронежской области

Василий А. Славский[1]✉, slavskiyva@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-6579-0344
Дарья А. Литовченко[1], timashchuk90@mail.ru https://orcid.org/ 0000-0003-2973-7447

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Совершенствование системы превентивного управления лесопожарными рисками является глобальной проблемой в области охраны лесов. Вид возникшего пожара, его интенсивность и дальнейшее распространение на территории лесных экосистем определяются запасами и влажностью лесных горючих материалов. Одним из важнейших компонентов накопления горючих материалов в насаждениях являются параметры древесного опада (лесной подстилки). При этом, динамика накопления древесного опада, а также особенности насаждений, формирующих его структуру, учитывается недостаточно, как в действующих нормативных и правовых документах при определении класса природной пожарной опасности в лесах, так и при оценке лесопожарных рисков. В связи с этим, основной целью работы является составление табличной модели, характеризующей динамику накопления древесного опада в разновозрастных насаждениях, произрастающих различных типах лесорастительных условий на территории Воронежской области. Для измерения толщины лесной подстилки проведено натурное обследование и заложены временные пробные площадки в разновозрастных насаждениях. При подборе объектов исследования и проведении полевых работ применялись принципы сочетания случайной и систематической выборки, использованы общепринятые методики. Для оценки превентивной пожарной опасности в лесах проанализирован комплекс лесоводственно-биологических факторов лесопожарного риска в части накопления древесного опада. Установлено, что наиболее значимыми критериями для формирования общей массы лесной подстилки являются доля хвойных пород в составе (F=18) и диаметр кроны (F=12). Группа возраста насаждений (F=9) и тип лесорастительных условий (F=6) также оказывают существенное влияние на интенсивность накопления древесного опада. Составленная табличная модель динамики накопления древесного опада (толщины лесной подстилки) в чистых хвойных и смешанных древостоях с различной долей хвойных пород в составе, для насаждений различных групп возраста, произрастающих в разных ТЛУ позволяет использовать дистанционные методы при определении динамики накопления древесного опада. Выявлена прямая связь увеличения толщины лесной подстилки в зависимости от доли хвойных пород в составе, что является дополнительным критерием для повышения природной пожарной опасности в лесах. Также установлено, что лесная подстилка в сухих лесорастительных условиях накапливается медленнее, чем в свежих.

Ключевые слова: *древесный опад (лесная подстилка), лесные горючие материалы, тип лесорастительных условий, охрана лесов, природная пожарная опасность*

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ ФЗУР-2024-0002) по теме «Разработка технологических решений, направленных на повышение эффективности лесопожарного мониторинга и детализацию оценки последствий лесных пожаров в условиях Центральной лесостепи».

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Славский В.А., Литовченко Д.А. Динамика древесного опада в лесостепной зоне Воронежской области // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 276-293. – *Библиогр.: с. 290-292 (21 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/16.

Поступила 02.09.2025. ***Пересмотрена*** 05.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025

Article
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/16
УДК 630*181.311.3

Dynamics of tree litter in the forest-steppe zone of the Voronezh region

Vasiliy A. Slavskiy[1]✉, slavskiyva@yandex.ru , https://orcid.org/0000-0002-6579-0344
Daria A. Litovchenko[1], timashchuk90@mail.ru; https://orcid.org/ 0000-0003-2973-7447

[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

Abstract

Improving the system of preventive management of forest fire risks is a global problem in the field of forest protection. The type of fire that occurs, its intensity and further spread in the territory of forest ecosystems are determined by the reserves and humidity of forest combustible materials. One of the most important components of the accumulation of combustible materials in stands is the parameters of wood litter (forest litter). At the same time, the dynamics of accumulation and features of stands that form the structure of wood litter are not taken into account sufficiently, both in the current regulatory and legal documents when determining the class of natural fire hazard in forests and in assessing forest fire risks. In this regard, the main goal of the work is to compile a tabular model characterizing the dynamics of accumulation of wood litter in stands of different ages growing in different types of forest growth conditions in the Voronezh region. To measure the thickness of the forest litter, a field survey was carried out and temporary test sites were laid in stands of different ages. When selecting the objects of study and conducting field work, the principles of combining random and systematic sampling were used, and generally accepted methods were used. To assess the preventive fire hazard in forests, a set of silvicultural and biological factors of forest fire risk in terms of accumulation of wood litter was analyzed. It was found that the most significant criteria for the formation of the total mass of wood litter are the proportion of coniferous species in the composition (F = 18) and the crown diameter (F = 12). The age group of stands (F = 9) and the type of forest growing conditions (F = 6) also have a significant impact on the intensity of wood litter accumulation. The compiled tabular model of the dynamics of wood litter accumulation (forest litter thickness) in pure coniferous and mixed stands with different proportions of coniferous species in the composition, for stands of different age groups growing in different TLUs allows using remote sensing methods in determining the dynamics of wood litter accumulation. A direct connection between the increase in forest litter thickness and the proportion of coniferous species in the composition has been revealed, which is an additional criterion for increasing the natural fire hazard in forests. It has also been established that forest litter accumulates more slowly in dry forest conditions than in fresh ones.

Keywords: *wood litter (forest litter), forest combustible materials, type of forest growing conditions, forest protection, natural fire hazard*

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FZUR-2024-0002) "Development of technological solutions aimed at increasing the efficiency of forest fire monitoring and detailing the assessment of the consequences of forest fires in the Central Forest-Steppe".

Acknowledgments: The authors thank the referees for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of Interest: The authors have declared no conflict of interest.

***For citation*:** Slavskiy V.A., Litovchenko D.A. (2025) Dynamics of tree litter in the forest-steppe zone of the Voronezh region. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 281-298 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/16.

Received 02.09.2025. ***Revised*** *05.10.2025.* ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

В лесных насаждениях, одновременно с приростом фитомассы первичной продукции древесной части (ствол, ветви, листья), происходит опад органического вещества, который аккумулирует накопление лесных горючих материалов (ЛГМ).

Возникновение и распространение лесных пожаров тесно связаны со структурой и состоянием напочвенного покрова и древесного опада (лесной подстилки) [1, 2]. Основными пирогенными характеристиками древесного опада, определяющими возникновение пожароопасной ситуации в лесах, влияющими на количество возгораний и легкость воспламенения, являются его мощность (высота) и видовой состав [3]. Эти параметры характеризуются высокой изменчивостью и коррелируют с расположением стволов деревьев, рельефом местности и наличием подлесочной растительности [4]. Кроме того, структура и влажность лесной подстилки динамичны во времени, зависят от возраста древостоя, разнообразия почвообразующих пород и особенностей напочвенного покрова [5].

Вид возникшего пожара, его интенсивность и дальнейшее распространение определяются запасами и влажностью горючих материалов, в т.ч. параметрами лесной подстилки. Этот факт подтверждается в работах отечественных и зарубежных авторов: Н.П. Курбатского[20], В.В. Усени[21], В.Г. Мамонтова и др. [7], Шахматова Е.Ю. [8], С.Н. Жаринова (с соавт.) [9], P. Labenski (et. all) [10], Fu Zexin (et. all) [11] и мн. др. По данным Г. Я. Климчика [12, 13], ключевым показателем, который определяет способность горючего материла к возникновению загорания, является его влагосодержание, зависящее от лесорастительных условий и метеорологических факторов.

Несмотря на то, что лесная подстилка является важным фактором лесопожарного риска, динамика накопления и особенности насаждений, формирующих структуру древесного опада, учитывается недостаточно [14], как в действующих нормативных и правовых документах при определении класса природной пожарной опасности в лесах[22] [23], так и при оценке лесопожарных рисков [15]. Основной причиной поверхностного учета параметров лесной подстилки является сложность их оценки и контроля. При дистанционных методах определение характеристик лесной подстилки зачастую невозможно из-за высокой сомкнутости крон древостоя [16], а наземное натурное обследование является излишне долговременным и трудоемким процессом [17, 18]. Следовательно,

[20] Курбатский Н.П. Итоги и перспективы исследования природы лесных пожаров. Горение и пожары в лесу. 1973; 9–26.

[21] Усеня В.В. Лесные пожары, последствия и борьба с ними. Гомель: ИЛ НАН Беларуси. 2002; 206.

[22] Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 5 июля 2011 г. № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118509/ (дата обращения: 06.02.2025).

[23] Постановление Правительства РФ от 07 октября 2020 № 1614 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364560/ (дата обращения: 12.02.2025).

вопрос об определении характеристик древесного опада в различных условиях произрастания насаждений и изучении его влияния на возникновение пожароопасной ситуации в лесах, является актуальным в области совершенствования системы лесопожарного мониторинга.

Целью работы является составление табличной модели, характеризующей динамику накопления древесного опада в разновозрастных насаждениях, произрастающих различных типах лесорастительных условий на территории Воронежской области и определение уровней значимости лесоводственно-таксационных показателей при формировании лесной подстилки.

Материалы и методы

Для измерения толщины лесной подстилки проведено натурное обследование и заложены временные пробные площадки (ВПП) в разновозрастных насаждениях. Размер ВПП варьировал от 0,25 до 0,5 га, в зависимости от конфигурации и площади выдела.

Измерения осуществляли с использованием принципов сочетания случайной и систематической выборки, когда замеры толщины лесной подстилки на ВВП проводились линейкой, с точностью до 0,1 см, через каждые 5 м в пределах лесотаксационного выдела. Количество измерений составляло не менее 50 шт. на каждой ВПП. Замеры проводили в весенний период после полного листораспускания; следовательно, измерялась толщина слоя лесной подстилки, уплотнившегося под воздействием снегового покрова.

Кроме того, на ВПП определяли основные таксационные характеристики насаждения методом глазомерно-измерительной таксации[24]. Диаметр кроны определяли по проекции в двух противоположных направлениях (С-Ю/З-В) у 3-х средних деревьев с каждой ступени толщины с помощью лазерного дальномера. Точность измерения – 0,5 м. Учитывалось количество подроста и подлеска по степени густоты и крупности[25].

Для определения типов лесорастительных условий (ТЛУ) использовали классификационную схему П.С. Погребняка [19]. Тип леса определяли по классификации В.Н. Сукачева [16].

С помощью программы STATISTICA 13[26] и СтатСофт 2,5 проведен статистический последовательный анализ на основе рекомендаций Б.А. Доспехова[27]. Использованы методы описательной статистики, корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа.

Оценку адекватности составленной регрессивной модели оценивали с помощью коэффициента детерминации R^2 и скорректированный R^2_{adj}. [20]. С помощью теста Колмогорова-Смирнова (D) проверили нормальность остатков (отклонений наблюдаемых значений от теоретических) в уравнениях линейной регрессии [21]. С помощью вычисленного фактора инфляции дисперсии (VIF) вычислили уровень мультиколлинеарности (**VIF = 1** - отсутствие мультиколлинеарности; **VIF между 1 и 5** - умеренная мультиколлинеарность; **VIF > 5** – высокая мультиколлинеарность; **VIF > 10** - серьёзная мультиколлинеарность):

$$VIF = \frac{1}{1-R^2} \qquad (1)$$

где VIF – фактор инфляции дисперсии;

R^2 – коэффициент детерминации, полученный путём регрессии этой независимой переменной против всех других независимых переменных в модели.

При проведении дисперсионного анализа, рассчитывали силу влияния действующего фактора на результативный признак (1) и устанавливали их уровни значимости, а для проверки достоверности различий между средними значениями изучаемых

[24] ОСТ 56–69–83 Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. М. 59 с.

[25] Приказ МПР РФ от 05 августа 2022 года № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» https://docs.cntd.ru/document/351878696?ysclid=lmu9cw8l6i204569898

[26] STATISTICA версия 13.0-StatSoft. (2021).

[27] Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): учебник // М.: «Колос». 2011; 547.

факторов и определения их статистической значимости, использовали t-критерий Стьюдента, рассчитываемый по формуле (2):

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}} \qquad (2)$$

где M_1 – средняя арифметическая первой сравниваемой совокупности (группы);

M_2 – средняя арифметическая второй сравниваемой совокупности (группы);

m_1 – средняя ошибка первой средней арифметической;

m_2 – средняя ошибка второй средней арифметической.

Объекты исследований

Древесный опад, формирующий лесную подстилку, относится к наиболее быстро воспламеняющимся ЛГМ. В целях изучения динамики накопления хвои (листвы) и корректировки класса природной пожарной опасности в лесах, необходимо определить толщину лесной подстилки. Для обеспечения репрезентативности выборки заложено более 100 временных пробных площадок (ВПП), расположенных в наиболее типичных для Воронежской области ТЛУ.

Исследованиями охвачены чистые хвойные древостои (доля сосны в составе 90-100%), смешанные хвойные древостои (доля сосны 50-80%), хвойно-лиственные древостои (доля сосны 30-40%), произрастающие в различных группах ТЛУ (сухие, свежие, влажные) и разделенные по группам возраста. Данные по местоположению ВПП (лесничество, участковое лесничество, квартал, выдел) приведены в таблицах 1-3.

Таблица 1

Сведения о местоположении ВПП, заложенных в чистых хвойных древостоях (квартал/выдел)

Table 1

Information on the location of the runway laid in pure coniferous stands (quarter/section)

Возраст/ТЛУ | Age/FGC	A_1 | A_1	A_2 | A_2	B_2 | B_2	B_3 | B_3	C_2 | C_2	C_2Д | C_2D
Молодняки | Youngsters	35/11	36/12	33/12 48/18	108/20	48/3	3/24
Средневозрастные | Middle aged	36/14	76/19 89/21	79/5 36/25	78/11	42/3	8/56
Приспевающие | Coming soon	54/8 32/5	46/25	48/5 57/9	109/41	42/11 21/18	34/3
Спелые и перестойные | Ripe and overripe	102/24	74/9 6/12	44/10 60/11	48/4 62/28	21/1	21/18

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 2

Сведения о местоположении ВПП, заложенных в смешанных хвойных древостоях (квартал/выдел)

Table 2

Information on the location of the runway laid in mixed coniferous forest stands (quarter/section)

Возраст/ТЛУ | Age/ FGC	A_1 | A_1	A_2 | A_2	B_2 | B_2	B_3 | B_3	C_2 | C_2	$C_2Д$ | C_2D
Молодняки | Youngsters	35/14	77/39	79/13 85/14	108/2	28/11	12/3
Средневозрастные | Middle aged	36/21 27/15	77/16 89/2	78/14 44/2	72/8	42/19 11/17	44/5
Приспевающие | Coming soon	74/14 57/16	109/58 86/7	73/11 32/17	65/7 63/16	42/35 12/8	2/18 9/12
Спелые и перестойные | Ripe and overripe	92/28	61/4	44/17 28/27	44/33	28/55	12/8

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 3

Сведения о местоположении ВПП, заложенных в хвойно-лиственных древостоях (квартал/выдел)

Table 3

Information on the location of the runway laid in coniferous-deciduous forest stands (quarter/section)

Возраст/ТЛУ | Age/ FGC	A_1 | A_1	A_2 | A_2	B_2 | B_2	B_3 | B_3	C_2 | C_2	$C_2Д$ | C_2D
Молодняки | Youngsters	–	66/7 47/9	37/23	98/26	6/4	39/17
Средневозрастные | Middle aged	–	77/34	79/15 89/16	77/34	43/31 31/18	1/9 8/24
Приспевающие | Coming soon	–	109/22 14/8	36/6 20/3	40/42	44/41 10/18	55/24 26/10
Спелые и перестойные | Ripe and overripe	–	89/19	79/22 70/22	44/35	28/48 3/15	27/3 33/4

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Примечание: Цветом отмечены объекты, расположенные на территории:

Левобережное участковое лесничество Пригородного лесничества

Правобережное участковое лесничество Пригородного лесничества

Животиновское участковое лесничество Пригородного лесничества

Сомовское лесничество (без деления на участковые лесничества)

Результаты и обсуждение

Лесная подстилка в чистых хвойных насаждениях состоит из хвои, веток, коры и шишек. В хвойно-лиственных древостоях на толщину лесной подстилки в основном приходится на листья, ветки и хвою. Расчеты показали, что более высокие значения толщины лесной подстилки наблюдаются в чистых хвойных древостоях, возрастая как по группам возраста – от молодняков до спелых и перестойных, так и с увеличением плодородности и богатства почв (таблица 4). Полученные значения по толщине лесной подстилки статистически достоверны, при сравнении по критерию Стьюдента (при $t \geq 1{,}96$) на уровне вероятности $p \leq 0{,}05$.

Таблица 4

Толщина лесной подстилки (см) с дифференциацией по группам возраста в насаждениях, произрастающих в различных типах лесорастительных условий на территории Центральной лесостепи

Table 4

Forest litter thickness (sm) differentiated by age groups in stands growing in different types of forest growth conditions in the Central Forest-Steppe

Группа возраста/ТЛУ | Age group/FGC	A_1 | A_1	A_2 | A_2	B_2 | B_2	B_3 | B_3	C_2 | C_2	$C_2Д$ | C_2D
Чистые хвойные (доля сосны 90-100%) | Pure coniferous (pine content 90-100%)						
Молодняки* | Youngsters	1,1±0,06	1,9±0,09	1,4±0,06	1,8±0,09	2,7±0,15	2,4±0,11
Средневозрастные | Middle aged	2,6±0,12	2,9±0,11	2,8±0,12	2,6±0,12	3,6±0,15	3,5±0,16
Приспевающие | Coming soon	3,4±0,17	3,7±0,17	3,5±0,16	3,1±0,15	4,2±0,19	4,3±0,20
Спелые и перестойные | Ripe and overripe	4,0±0,17	4,4±0,19	4,6±0,21	3,6±0,15	4,6±0,22	4,7±0,22
Смешанные хвойные (доля сосны 50-80%) | Mixed conifers (pine share 50-80%)						
Молодняки* | Youngsters	1,0±0,05	1,3±0,06	1,8±0,08	1,8±0,08	2,5±0,11	2,3±0,10
Средневозрастные | Middle aged	2,3±0,11	2,6±0,10	2,4±0,09	2,4±0,11	3,5±0,16	3,8±0,18
Приспевающие | Coming soon	2,8±0,12	3,3±0,15	3,1±0,13	2,9±0,12	4,1±0,18	4,1±0,21
Спелые и перестойные | Ripe and overripe	3,4±0,15	3,9±0,18	4,3±0,20	3,5±0,15	4,4±0,22	4,4±0,21
Хвойно-лиственные (доля сосны 30-40%) | Coniferous-deciduous (pine share 30-40%)						
Молодняки* | Youngsters	–	1,2±0,07	1,7±0,08	1,6±0,08	2,3±0,10	2,0±0,11
Средневозрастные | Middle aged	–	1,8±0,08	2,3±0,09	2,2±0,11	3,2±0,14	3,2±0,14
Приспевающие | Coming soon	–	2,2±0,10	2,8±0,12	2,9±0,15	3,6±0,13	3,6±0,14
Спелые и перестойные | Ripe and overripe	–	2,6±0,12	3,0±0,13	3,1±0,18	3,6±0,15	3,7±0,12

* данной возрастной группе отмечен разброс средних значений в связи с наибольшей дисперсией действующего фактора и разница в 10 лет (в пределах возрастной группы) может существенно сказаться на итоговом результате.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

При анализе толщины лесной подстилки выявлена очень высокая изменчивость признака (в насаждениях более старших возрастов, коэффициент изменчивости может превышать 50%). Так, в чистых сосновых приспевающих древостоях, произрастающих в ТЛУ B_2, наблюдается варьирование толщины лесной постилки от 1,5 до 7,7 см, при среднем показателе 3,2 см. Помимо лесорастительных условий и породного состава насаждения, установлен ряд факторов, обуславливающих дисперсию, а именно: степень развитости (жизнеспособности) кроны, сомкнутость крон деревьев, характер напочвенного покрова, особенности рельефа и наличие микропонижений и т.д. Кроме того, на приствольных участках под кронами деревьев сосны обыкновенной достоверно наблюдаются более высокая толщина лесной подстилки по сравнению с межкроновым пространством.

С увеличением расстояния от стволов деревьев снижается толщина лесной подстилки. Следовательно, распределение лесной подстилки по площади выдела может быть крайне неравномерным. Динамика толщины лесной подстилки в различных возрастных группах древостоя, произрастающих в разных типах лесорастительных условий представлена на рисунке 1.

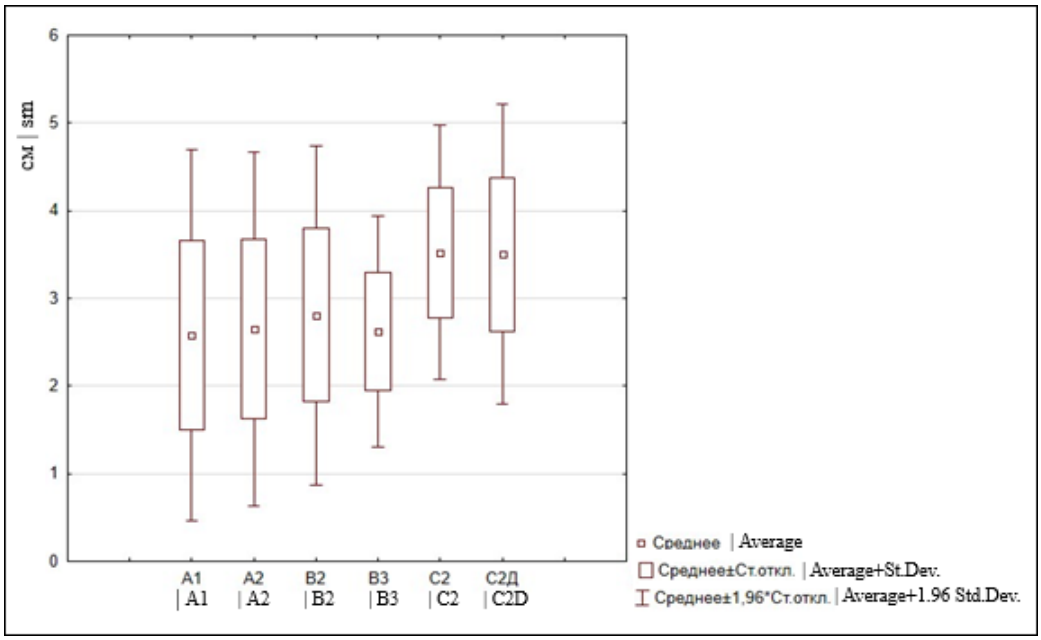


Рисунок 1. Варьирование толщины лесной подстилки в различных типах лесорастительных условий, см

Figure 1. Variation in forest litter thickness in different types of forest growing conditions, sm

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

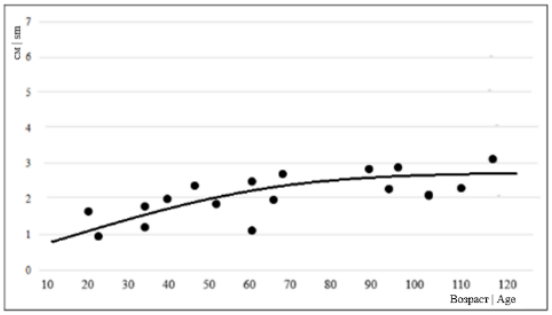
Нами отмечена тенденция увеличения толщины лесной подстилки в зависимости от плодородия почвы – в ТЛУ, расположенных в менее плодородных почвенных условиях, вне зависимости от возрастной группы, лесная подстилка была менее мощная, по сравнению с аналогичными по возрасту насаждениями, произрастающими на более тяжелых почвах. Минимальными значениями характеризуются условия сухого бора (A_1) – в среднем 2,5 см, а максимальными в свежих судубравах – в среднем около 3,5 см.

Увеличение толщины лесной подстилки от сухих условий произрастания к более влажным, выражено менее ярко, что свидетельствует о меньшей степени влияния влажности почвы на накопление древесного опада (рисунки 2-6).

Также на толщину лесной подстилки оказывает влияние мозаичность растительного покрова. В условиях свежего бора (A_2), где зачастую встречается скудный напочвенный покров, средняя толщина лесной подстилки примерно на 10 % ниже, чем в борах и суборях, в которых преобладают мхи (рисунок 2). Мощность лесной подстилки в сосновых молодняках колеблется от 0,8 до 3,2 см в чистых древостоях, при этом в хвойно-лиственных древостоях аналогичного возраста (доля сосны 30-40%) данный показатель варьирует от 0,3 до 2,2 см (рисунок 3).

Следует отметить, что влажной субори (B3) выявлена сопоставимая толщина лесной постилки по сравнению с более сухими условиями, что обусловлено нетипичными условиями для произрастания чистых сосняков на территории Воронежской области (рисунок 4). При этом, диапазон варьирования в условиях сухого бора (A1) выше – от 0,4 до 5,8 см, в то время как в условиях B3 выявлена наименьшая изменчивость признака (коэффициент варьирования в среднем составляет 15 %).

Большая толщина лесной подстилки в сухих и свежих сосняках является одной из причин частого развития устойчивых низовых пожаров, приводящих к значительному повреждению и дальнейшей гибели древостоев.



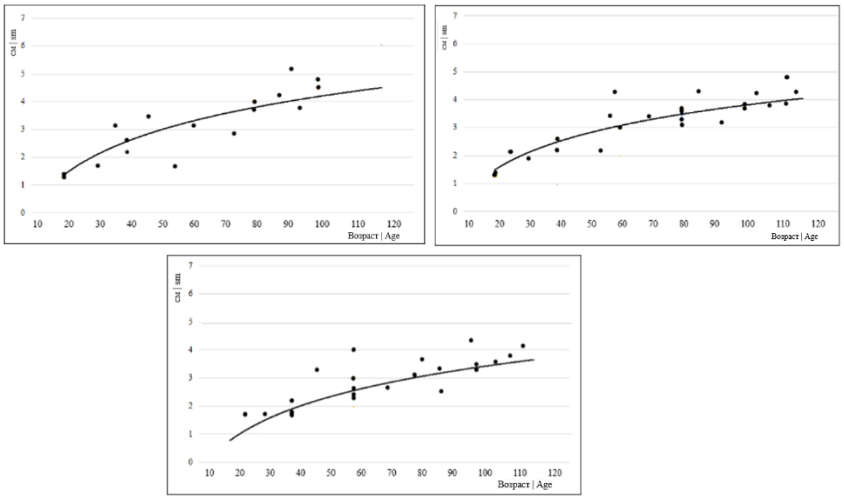
а) | a) б) | b) в) | c)

Рисунок 2. Динамика толщины лесной подстилки (см) в зависимости от возраста, в насаждениях, произрастающих в типе лесорастительных условий A_2: а) чистые хвойные (доля сосны 90-100%); б) с преобладанием хвойных (доля сосны 50-80%); в) с преобладанием лиственных (доля сосны 30-40%)

Figure 2. Dynamics of forest litter thickness (cm) depending on age, in stands growing in forest growth conditions type A2: a) pure coniferous (pine share 90-100%); b) with a predominance of conifers (pine share 50-80%); c) with a predominance of deciduous (pine share 30-40%)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



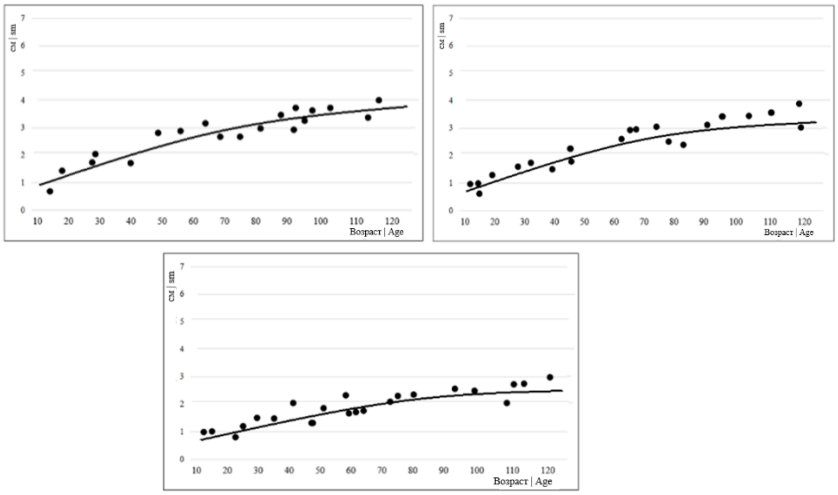
а) | a) б) | b) в) | c)

Рисунок 3. Динамика толщины лесной подстилки (см) в зависимости от возраста, в насаждениях, произрастающих в типе лесорастительных условий B_2: а) чистые хвойные (доля сосны 90-100%); б) с преобладанием хвойных (доля сосны 50-80%); в) с преобладанием лиственных (доля сосны 30-40%)

Figure 3. Dynamics of forest litter thickness (cm) depending on age, in stands growing in forest growth conditions type B2: a) pure coniferous (pine share 90-100%); b) with a predominance of conifers (pine share 50-80%); c) with a predominance of deciduous (pine share 30-40%)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



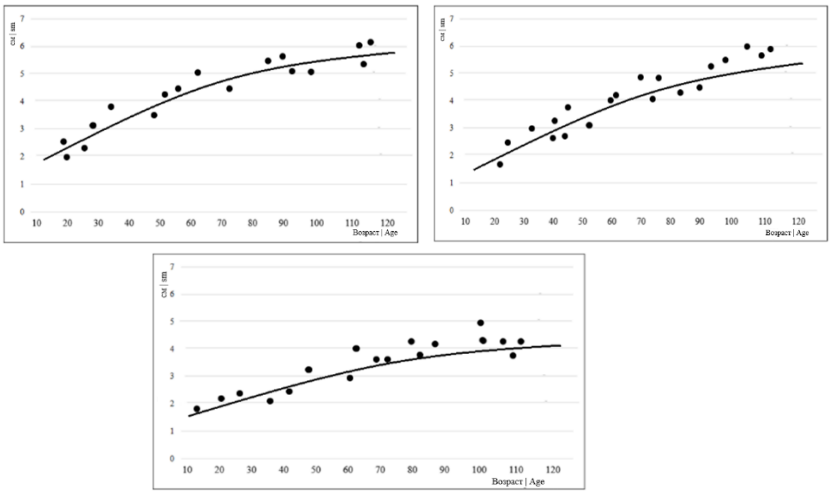
а) | a) б) | b) в) | c)

Рисунок 4. Динамика толщины лесной подстилки (см) в зависимости от возраста, в насаждениях, произрастающих в типе лесорастительных условий B_3: а) чистые хвойные (доля сосны 90-100%); б) с преобладанием хвойных (доля сосны 50-80%); в) с преобладанием лиственных (доля сосны 30-40%)

Figure 4. Dynamics of forest litter thickness (cm) depending on age, in stands growing in forest growth conditions type B3: a) pure coniferous (pine share 90-100%); b) with a predominance of conifers (pine share 50-80%); c) with a predominance of deciduous (pine share 30-40%)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



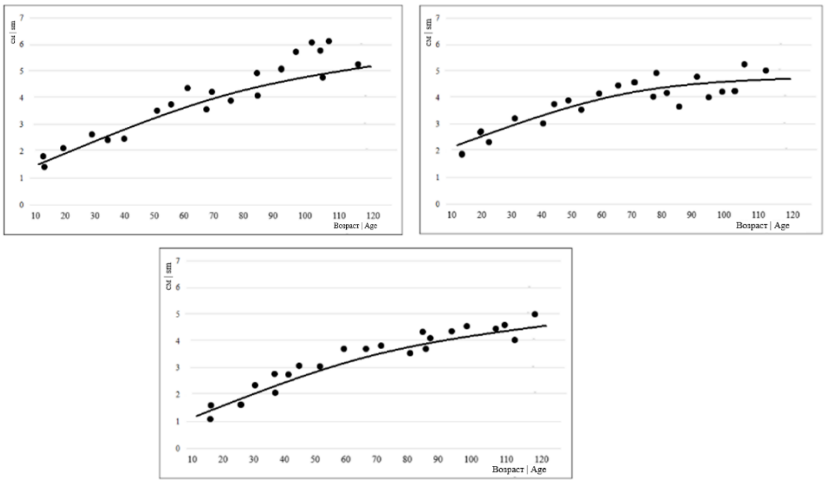
а) | a) б) | b) в) | c)

Рисунок 5. Динамика толщины лесной подстилки (см) в зависимости от возраста, в насаждениях, произрастающих в типе лесорастительных условий C_2: а) чистые хвойные (доля сосны 90-100%); б) с преобладанием хвойных (доля сосны 50-80%); в) с преобладанием лиственных (доля сосны 30-40%)

Figure 5. Dynamics of forest litter thickness (cm) depending on age, in stands growing in forest growth conditions type C2: a) pure coniferous (pine share 90-100%); b) with a predominance of conifers (pine share 50-80%); c) with a predominance of deciduous (pine share 30-40%)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



а) | a) б) | b) в) | c)

Рисунок 6. Динамика толщины лесной подстилки (см) в зависимости от возраста, в насаждениях, произрастающих в типе лесорастительных условий C_2Д: а) чистые хвойные (доля сосны 90-100%); б) с преобладанием хвойных (доля сосны 50-80%); в) с преобладанием лиственных (доля сосны 30-40%)

Figure 6. Dynamics of forest litter thickness (cm) depending on age, in stands growing in forest growth conditions type C2D: a) pure coniferous (pine share 90-100%); b) with a predominance of conifers (pine share 50-80%);

c) with a predominance of deciduous (pine share 30-40%)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Наибольшие средние значения изучаемого признака выявлены в свежих судубравах (С2 и С2D) – около 3,5 см (рисунки 5 и 6). С учетом состава, возраста, полноты древостоя толщина лесной подстилки в данных ТЛУ может варьировать от 0,5 до 8,5 см.

При отсутствии напочвенного покрова, препятствующего горению, в данных ТЛУ возможно повышение рисков возникновения пожароопасной ситуации в лесах.

Для установления зависимости между толщиной лесной подстилки и возрастом древостоя и определения тесноты связи проведен корреляционный анализ. Выявлена высокая теснота связи при оценке накопления лесной подстилки с возрастом во всех изученных древостоях; коэффициент корреляции (r) составляет: в чистых хвойных (доля сосны 90-100%) – 0,77; в смешанных хвойных (доля сосны 50-80%) – 0,80; в хвойно-лиственных (доля сосны 30-40%) – 0,73.

В сосновых молодняках в среднем мощность лесной подстилки равна 1,8 см, в средневозрастных насаждениях на отдельных участках возрастает до 4,1 см (при среднем значении 2,9 см), а к возрасту 100 лет (спелые древостои) толщина лесной подстилки значительно увеличивается и в чистых хвойных древостоях достигает 5,5 см.

Достоверно установлено по критерию Стьюдента ($t_ф \geq t_{st}$), что в зависимости от увеличения доли хвойных пород составе древостоя повышается толщина лесной подстилки (рисунок 7). При этом, повышение риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах связано не только с объемами накопления, но и с повышенной горючестью хвойного древесного опада по сравнению с лиственным.

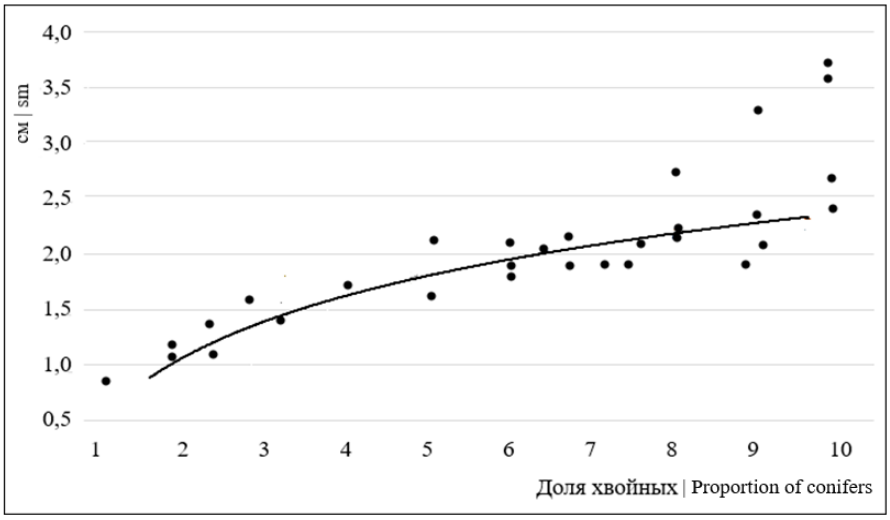


Рисунок 7. Зависимость толщины лесной подстилки от доли хвойных пород в составе древостоя
Figure 7. Dependence of forest litter thickness on the proportion of coniferous species in the forest stand
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Следует отметить, что в наших исследованиях степень ослабления насаждений не оказала существенного влияния на толщину лесной подстилки, так как изначально были подобраны и изучены древостои, имеющие средневзвешенную категорию состояния не более 2,5 баллов[28]. При этом на формирование опада могут оказывать влияние параметры диаметров крон деревьев и их сомкнутость, густота подроста и подлеска, развитие живого напочвенного покрова и другие лесоводственные факторы.

Исходя из этого, составлены регрессионные уравнения, отражающие зависимость накопления толщины лесной подстилки от основных лесоводственно-таксационных показателей в насаждениях разного породного состава. Кроме того, регрессионные уравнения дифференцированы в зависимости от принадлежности к возрастной группе – молоднякам (3, 7, 11), средневозрастным (4, 8, 12), приспевающим (5, 9, 13), а также спелым и перестойным (6, 10, 14) насаждениям. При проведении дистанционного зондирования Земли и дешифрировании снимков высокого пространственного разрешения, можно прямым способом определить диаметр кроны и сомкнутость полога, что в дальнейшем позволит установить параметры, характеризующие мощность лесного древесного опада.

Чистые хвойные (доля сосны 90-100%):

$$ЛП = -0{,}382 + 0{,}733 \times СВ^2 + 0{,}628 \times СГ^2 + 0{,}539 \times D_к \quad (3)$$

$$R^2=0{,}74,\ p < 0{,}05,\ SE=0{,}0006$$

$$ЛП = -0{,}435 + 0{,}987 \times СВ^2 + 0{,}797 \times СГ^2 + 0{,}698 \times D_к \quad (4)$$

$$R^2=0{,}76,\ p < 0{,}05,\ SE=0{,}001$$

$$ЛП = -0{,}562 + 1{,}192 \times СВ^2 + 0{,}886 \times СГ^2 + 0{,}745 \times D_к \quad (5)$$

$$R^2=0{,}79,\ p < 0{,}05,\ SE=0{,}002$$

$$ЛП = -0{,}693 + 1{,}336 \times СВ^2 + 0{,}962 \times СГ^2 + 0{,}791 \times D_к \quad (6)$$

$$R^2=0{,}73,\ p < 0{,}05,\ SE=0{,}001$$

Смешанные хвойные (доля сосны 50-80%):

$$ЛП = -0{,}327 + 0{,}657 \times СВ^2 + 0{,}533 \times СГ^2 + 0{,}468 \times D_к \quad (7)$$

$$R^2=0{,}77,\ p < 0{,}05,\ SE=0{,}0005$$

$$ЛП = -0{,}420 + 0{,}785 \times СВ^2 + 0{,}668 \times СГ^2 + 0{,}535 \times D_к \quad (8)$$

$$R^2=0{,}79,\ p < 0{,}05,\ SE=0{,}003$$

[28] Постановление Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 года № 2047 «Об утверждении Правила санитарной безопасности в лесах». https://docs.cntd.ru/document/573053313

ЛП = -0,512 + 0,813×СВ^2 +0,715×СГ^2 + 0,623×$D_к$ (9)

R^2=0,80, p < 0,05, SE=0,0002

ЛП = -0,598 + 0,987×СВ^2 +0,849×СГ^2 +0,703×$D_к$ (10)

R^2=0,75, p < 0,05, SE=0,001

Хвойно-лиственные (доля сосны 30-40%):

ЛП = -0,306 + 0,632×СВ^2 +0,507×СГ^2 +0,409×$D_к$ (11)

R^2=0,73, p < 0,05, SE=0,0003

ЛП = -0,389 + 0,705×СВ^2 +0,583×СГ^2 +0,488×$D_к$ (12)

R^2=0,80, p < 0,05, SE=0,002

ЛП = -0,447 + 0,787×СВ^2 +0,674×СГ^2 +0,575×$D_к$ (13)

R^2=0,77, p < 0,05, SE=0,0003

ЛП = -0,534 + 0,846×СВ^2 +0,758×СГ^2 +0,692×$D_к$ (14)

R^2=0,79, p < 0,05, SE=0,0001

где, ЛП – толщина лесной подстилки, см; СВ – сомкнутость вертикальная; СГ – сомкнутость горизонтальная; $D_к$ – диаметр кроны, м.

В ходе проверки адекватности работы регрессионных уравнений установлено, что подобраны значимые по t-критерию Стьюдента переменные для расчета толщины лесной подстилки. Коэффициент детерминации (R^2) находится в пределах от 0,73 до 0,80. Для более точной оценки качества уравнений регрессии нами рассчитан скорректированный $R^2_{adj,}$ который находится в пределах от 0,70 до 0,78. Для всех уравнений регрессии полученные значения по тесту Колмогорова–Смирнова (D) достоверно отличались от наблюдаемого (D > $D_{критический}$ (0,25). Полученные значения VIF >5, но <10 – выявлена значительная мультиколлинеарность (высокая корреляция между предикторами).

При проведении дисперсионного анализа выявлены достоверные различия между оценочными градациями лесной подстилки по толщине. В результате составлена шкала, дифференцированная по усредненным значениям и позволяющая использовать данные о толщине лесной подстилке при проведении дистанционного мониторинга (таблица 5).

Таблица 5

Оценочные градации для усредненных значений древесного опада (лесной подстилки)

Table 5

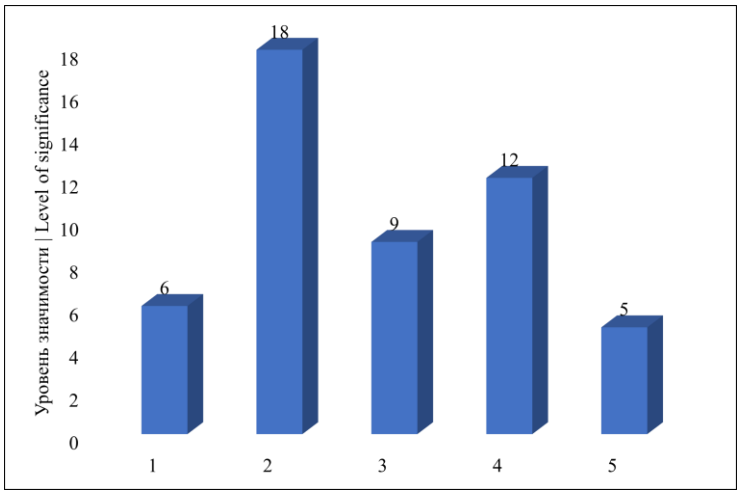
Evaluation gradations for average forest litter values

№ (t_n) | N (t_n)	Градации по толщине | Thickness gradations	Толщина подстилки, см | Thickness of bedding, sm	(t_{1-n})	t_{st}
1	отсутствует | absent	0,0-0,4	-	1,96
2	тонкая | thin	0,5-2,0	2,12	1,96
3	средняя | average	2,1-3,5	3,71	1,96
4	толстая | thick	3,6-5,0	4,89	1,96
5	оч. толстая | very thick	5,1 и более	≥6,65	1,96

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для проведения детальной оценки влияния действующих факторов на результативный признак проведен дисперсионный анализ, в ходе которого выявлены лесоводственно-таксационные показатели, имеющие наибольший уровень значимости (F) для определения мощности древесного опада (рисунок 8).



Условные обозначения: 1 – тип лесорастительных условий, 2 – доля хвойных пород в составе, 3 – группа возраста, 4 – диаметр кроны (сомкнутость), 5 – таксационные характеристики (диаметр ствола, высота дерева, количество деревьев, густота подроста, подлеска).

Рисунок 8. Уровни значимости лесоводственно-таксационных характеристик в общей массе накопления древесного опада (лесной подстилки)

Legend: 1 – type of forest growing conditions, 2 – proportion of coniferous species in the composition, 3 – age group, 4 – crown diameter (density), 5 – taxation characteristics (trunk diameter, tree height, number of trees, density of undergrowth, undergrowth).

Figure 8. Levels of significance of silvicultural and taxation characteristics in the total mass of accumulated wood litter (forest litter)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Если рассматривать комплекс лесоводственно-таксационных признаков насаждения, то наиболее значимыми для формирования общей массы древесного опада являются доля хвойных пород в составе (F=18) и диаметр кроны (F=12). Тип лесорастительных условий (F=6) и группа возраста насаждений (F=9) также оказывают существенное влияние на интенсивность накопления древесного опада.

Для оценки превентивной пожарной опасности в лесах необходимо проанализировать комплекс лесоводственно-биологических факторов и выявить ключевые параметры, способствующие возникновению пожаров. Следовательно, особую актуальность приобретает организация оперативно работающей системы детальной оценки пожарной опасности территорий, учитывающая лесоводственно-биологические особенности лесов и состояние растительности.

Заключение

1. На основе материалов натурного обследования, составлена табличная модель динамики накопления древесного опада (толщины лесной подстилки) в чистых хвойных и смешанных древостоях с различной долей хвойных пород в составе, для насаждений различных групп возраста, произрастающих в разных ТЛУ. Данная модель позволит учитывать накопление древесного опада при проведении лесопожарного мониторинга и скорректировать уровень риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах.

2. Выявлена прямая корреляция увеличения толщины лесной подстилки в зависимости от доли хвойных пород в составе – в разрезе различных возрастных групп r=073…0,80. Кроме того, увеличение риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах связано не только с объемами накопления, но и с повышенной горючестью хвойного древесного опада, что является

дополнительным критерием для повышения природной пожарной опасности на лесных участках с повышенным содержанием хвойного древесного опада. Также установлено, что объемы лесной подстилки в сухих лесорастительных условиях накапливаются медленнее, чем в свежих.

3. На основе экспериментальных данных разработана оценочная шкала для усредненных значений толщины лесной подстилки, позволяющая использовать дистанционные методы при определении динамики накопления древесного опада.

4. Составлены регрессионные уравнения, отражающие зависимость толщины лесной подстилки от основных лесоводственно-таксационных показателей, обеспечивающие высокую степень аппроксимации по t-критерию Стьюдента – коэффициент детерминации (R^2) находится в пределах от 0,65 до 0,89.

Список литературы

1. Slavskiy V., Litovchenko D. Matveev S. Sheshnitsan S. Larionov M.V Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain. Land. 2023; 12: 103. – DOI: 10.3390/land12010103
2. Kumar G., Kumar A., Saikia P., Roy P.S., Khan M.L. Ecological impacts of forest fire on composition and structure of tropical deciduous forests of central India. Phys. Chem. Earth. 2022; 128: 103240. – DOI:10.1016/j.pce.2022.103240
3. Лиханова И.А., Денева С.В., Холопов Ю.В, Рудь Е.А., Е.А. Скребенков, Лаптева Е.М. Особенности лесных подстилок в разных типах среднетаёжных лесов // Теоретическая и прикладная экология. – 2024. – № 2. – С. 72-81. – DOI: 10.25750/1995-4301-2024-2-072-081
4. Van The Pham, Tuyet Anh Thi Do, Hau Duc Tran, Anh Ngoc Thi Do. Classifying forest cover and mapping forest fire susceptibility in Dak Nong province, Vietnam utilizing remote sensing and machine learning. Ecological Informatics. 2024; 79: 102392. – DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102392.
5. Аксенов С.Г., Леткина О.Г. Пирогенное воздействие на растительный покров // Научный аспект. – 2024. – Т. 3 (6). – С. 336-342. – URL: https://elibrary.ru/qiwovn/
6. Vilaplana D.F., Lucas-Borja M.E., Soria R., Miralles I., Ortega R., Abdennbi S., Carmona-Yáñez M.D., Plaza-Alvarez P.A., Santana V.M., Zema D.A. One-year effects of stand age, pre-fire treatments, and hillslope aspect on recovery of plant diversity and soil properties in a Mediterranean forest burnt by a severe wildfire. Forest Ecology and Management. 2024; 566: 122068. – DOI: 10.1016/j.foreco.2024.122068.
7. Мамонтов В.Г., Савичев А.Т., Ефимов О.Е. Сравнительная характеристика лесных подстилок дерново-подзолистых почв Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2022. – Т. 111. – С. 185-204. – DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-185-204
8. Шахматова Е.Ю., Убугунов Л.Л., Сымпилова Д.П. Послепожарные трансформации в сосновых лесах селенгинского среднегорья (Западное Забайкалье) // География и природные ресурсы. – 2021. – Т. 42 (1). – С. 65-72. – DOI: 10.15372/GIPR20210108
9. Жаринов С.Н., Голубева Е.И., Зимин М.В. Концептуальные основы организации охраны лесов от пожаров // Вопросы лесной науки. – 2020. – Т. 3 (3). – С. 1-8. – DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-8.
10. Labenski P., Ewald M., Schmidtlein S., Ewald Fassnacht F. Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 29 April. 2022; 102799. – DOI: 10.1016/j.jag.2022.102799.
11. Zexin Fu, Adu Gong, Jinhong Wan, Wanru Ba, Haihan Wang, Jiaming Zhang. Forest fire risk assessment model optimized by stochastic average gradient descent. Ecological Indicators. 2025; 170: 113006. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.113006.
12. Климчик Г. Я., Шалимо П. В., Бельчина О. Г. Оценка косвенного ущерба от лесных пожаров в сосняках // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2024. – Т. 1 (276). – С. 31–38. – DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-4.
13. Климчик Г. Я. Влияние лесных пожаров на запасы подстилки и потери элементов питания // Лесное хозяйство: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных

сотрудников и аспирантов, Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск : БГТУ. – 2024. – С. 146-148. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?edn=lxkjlc.

14. Славский В.А., Матвеев С.М., Мироненко А.В., Литовченко Д.А. Совершенствование методологии дистанционного мониторинга пожарной опасности в лесах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2024. Т. 3. – С. 113–131. – DOI: 10.21178/2079-6080.2024.3.113.
15. Иванов С.А. Системный анализ факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров в Северо-Западном федеральном округе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – Т. 4. – С. 26–34. – DOI: 10.24143/2073-5529-2022-4-26-34.
16. Slavskiy V., Matveev S., Sheshnitsan S., Litovchenko D., Larionov M.V., Shokurov A., Litovchenko P., Durmanov N. Assessment of Phytomass and Carbon Stock in the Ecosystems of the Central ForestSteppe of the East European Plain: Integrated Approach of Terrestrial Environmental Monitoring and Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles. Life. 2024; 14: 632. – DOI: 10.1051/bioconf/202414502013.
17. Славский В.А., Матвеев С.М. Некоторые аспекты закладки пробных площадей при проведении государственной инвентаризации лесов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – 1(41). – С. 56-63. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/5.
18. Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics. Sustainability. 2022; 14: 3384. – DOI:10.3390/su14063384
19. Мигунова Е.С. Лесная типология Г.Ф. Морозова – А.А. Крюденера – П.С. Погребняка – теоретическая основа лесоводства // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2017. – Т. 21 (5). – С. 52–63. – DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-52-63
20. Шевелина И.В., Нуриев Д.Н. Статистическая обработка лесоводственно-таксационной информации в среде STATISTICA. Екатеринбург: УГЛТУ. – 2022. – 112 с. – URL: https://elibrary.ru/PCJKNN
21. Sheldon M. Ross 11-Statistical validation techniques. Simulation (Sixth edition). 2023; 255-277. – DOI: 10.1016/B978-0-32-385738-3.00016-X

References

13. Slavskiy V., Litovchenko D. Matveev S. Sheshnitsan S. Larionov M.V Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain. Land, 2023; 12: 103. – DOI: https://doi.org/10.3390/land12010103.
14. Kumar G., Kumar A., Saikia P., Roy P.S., Khan M.L. Ecological impacts of forest fire on composition and structure of tropical deciduous forests of central India. Phys. Chem. Earth, 2022; 128: 103240. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103240.
15. Lihanova I.A., Deneva S.V., Holopov Ju.V, Rud' E.A., E.A. Skrebenkov, Lapteva E.M. Osobennosti lesnyh podstilok v raznyh tipah srednetajozhnyh lesov [Features of forest litter in different types of middle taiga forests]. Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija, 2024; 2: 72-81. – DOI: https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-2-072-081.
16. Van The Pham, Tuyet Anh Thi Do, Hau Duc Tran, Anh Ngoc Thi Do. Classifying forest cover and mapping forest fire susceptibility in Dak Nong province, Vietnam utilizing remote sensing and machine learning. Ecological Informatics, 2024; 79: 102392. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102392.
17. Aksenov S.G., Letkina O.G. Pirogennoe vozdejstvie na rastitel'nyj pokrov [Pyrogenic effect on vegetation]. Nauchnyj aspekt. 2024; 3; 6: 336-342.
18. Vilaplana D.F., Lucas-Borja M.E., Soria R., Miralles I., Ortega R., Abdennbi S., Carmona-Yáñez M.D., Plaza-Alvarez P.A., Santana V.M., Zema D.A. One-year effects of stand age, pre-fire treatments, and hillslope aspect on recovery of plant diversity and soil properties in a Mediterranean forest burnt by a severe wildfire. Forest Ecology and Management. 2024; 566: 122068. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122068.
19. Mamontov V.G., Savichev A.T., Efimov O.E. Sravnitel'naja harakteristika lesnyh podstilok dernovo-podzolistyh pochv Lesnoj opytnoj dachi RGAU–MSHA imeni K.A. Timirjazeva [Comparative characteristics of forest litter of sod-podzolic

soils of the Forest Experimental Dacha of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev]. Bjulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva. 2022; 111: 185-204. – DOI: https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-185-204.

20. Shahmatova E.Ju., Ubugunov L.L., Sympilova D.P. Poslepozharnye transformacii v sosnovyh lesah selenginskogo srednegor'ja (Zapadnoe Zabajkal'e) [Post-fire transformations in pine forests of the Selenga midlands (Western Transbaikalia)]. Geografija i prirodnye resursy. 2021; 42; 1: 65-72. – DOI: https://doi.org/10.15372/GIPR20210108.
21. Zharinov S.N., Golubeva E.I., Zimin M.V. Konceptual'nye osnovy organizacii ohrany lesov ot pozharov [Conceptual foundations for organizing forest fire protection]. Voprosy lesnoj nauki. 2020; 3; 3: 1-8. – DOI: https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-8.
22. Labenski P., Ewald M., Schmidtlein S., Ewald Fassnacht F. Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 29 April. 2022: 102799. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102799.
23. Zexin Fu, Adu Gong, Jinhong Wan, Wanru Ba, Haihan Wang, Jiaming Zhang. Forest fire risk assessment model optimized by stochastic average gradient descent. Ecological Indicators. 2025; 170: 113006. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113006.
24. Klimchik G. Ja., Shalimo P. V., Bel'china O. G. Ocenka kosvennogo ushherba ot lesnyh pozharov v sosnjakah [Estimation of indirect damage from forest fires in pine forests]. Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe hoz-vo, prirodopol'zovanie i pererab. vozobnovljaemyh resursov. 2024; (276): 31–38. – DOI: https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-4.
25. Klimchik G.Ja., Bel'china O.G. Vlijanie lesnyh pozharov na zapasy podstilki i poteri jelementov pitanija [The impact of forest fires on litter supply and nutrient losses]. Lesnoe hozjajstvo: materialy 88-j nauchno-tehnicheskoj konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov, Minsk, 24 janvarja–16 fevralja 2024 g. – Minsk: BGTU. 2024: 146-148.
26. Slavskiy V.A., Matveev S.M., Mironenko A.V., Litovchenko D.A. Sovershenstvovanie metodologii distancionnogo monitoringa pozharnoj opasnosti v leash [Improving the methodology of remote monitoring of forest fire hazards]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozjajstva. 2024; 3: 113–131. – DOI: https://doi.org/10.21178/2079-6080.2024.3.113.
27. Ivanov S.A. Sistemnyj analiz faktorov, vlijajushhih na vozniknovenie lesnyh pozharov v Severo-Zapadnom federal'nom okruge [A systems analysis of factors influencing the occurrence of forest fires in the Northwestern Federal District]. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika. 2022; 4: 26–34.
28. Slavskiy V., Matveev S., Sheshnitsan S., Litovchenko D., Larionov M.V., Shokurov A., Litovchenko P., Durmanov N. Assessment of Phytomass and Carbon Stock in the Ecosystems of the Central ForestSteppe of the East European Plain: Integrated Approach of Terrestrial Environmental Monitoring and Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles. Life. 2024; 14: 632. – DOI: https://doi.org/10.1051/bioconf/202414502013.
29. Slavskiy V.A., Matveev S.M. Nekotorye aspekty zakladki probnyh ploshhadej pri provedenii gosudarstvennoj inventarizacii lesov [Some aspects of laying out test plots during the state forest inventory]. Lesotehnicheskij zhurnal. 2021: 11; 1(41): 56-63. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.1/5.
30. Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics. Sustainability. 2022; 14: 3384. – DOI:10.3390/su14063384
31. Migunova E.S. Lesnaja tipologija G.F. Morozova – A.A. Krjudenera – P.S. Pogrebnjaka – teoreticheskaja osnova lesovodstva [Forest typology of G.F. Morozov – A.A. Krudener – P.S. Pogrebnyak – theoretical basis of forestry]. Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2017; 21; 5: 52–63. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-5-52-63.
32. Shevelina I.V., Nuriev D.N. Statisticheskaja obrabotka lesovodstvenno-taksacionnoj informacii v srede STATISTICA [Statistical processing of forestry and taxation information in the STATISTICA environment]. Ekaterinburg: UGLTU. 2022: 112.
33. Sheldon M. Ross 11-Statistical validation techniques. Simulation (Sixth edition). 2023: 255-277. – DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-32-385738-3.00016-X.

Сведения об авторах

✉ *Славский Василий Александрович* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация; 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6579-0344; e-mail: slavskiyva@yandex.ru.

Литовченко Дарья Андреевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация; 394087, e-mail: timashchuk90@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Vasiliy A. Slavskiy* – DSc (Agricultural Sciences), Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6579-0344, e-mail: slavskiyva@yandex.ru.

Daria A. Litovchenko – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: timashchuk90@mail.ru.

✉ – Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17
УДК 630*631.531:504.064.2

Анатомо-морфологические и биохимические показатели *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал)

Надежда В. Чукина[1]✉, nady_dicusar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5517-0240
Наталия В. Лукина[1], natalia.lukina@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-6425-6214
Елена И. Филимонова[1], Elena.Filimonova@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-6937-0139
Маргарита А. Глазырина[1], Margarita.Glazyrina@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8258-270X

[1]*ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина», ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620062, Российская Федерация*

В условиях интенсивного антропогенного воздействия на природные экосистемы особое значение приобретает изучение адаптационных возможностей древесных растений, используемых при рекультивации промышленных отвалов. Целью исследований было изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик 22-летних лесных культур *Picea obovata* Ledeb. в искусственных насаждениях на отвале месторождения россыпного золота в Свердловской области. В полевых условиях измеряли морфологические показатели деревьев. Анатомические параметры хвои изучали на поперечных срезах с использованием системы обработки изображений «SIAMS MesoPlant». Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) и содержание в хвое низкомолекулярных антиоксидантов (пролин, аскорбиновая кислота, фенольные соединения) анализировали стандартными спектрофотометрическими методами. На дражном отвале месторождения россыпного золота у *P. obovata* без проведения мероприятий по улучшению свойств субстрата происходило уменьшение высоты деревьев и диаметра ствола у корневой шейки, прироста ветвей и длины хвои. Ответная реакция ассимиляционного аппарата на стресс заключалась в увеличении площади поперечного сечения хвои, центрального цилиндра, общей площади смоляносной системы, утолщении покровных тканей, а также в усилении процессов перекисного окисления липидов, что сопровождалось накоплением в ней пролина и аскорбиновой кислоты. Корреляционный анализ показал, что на уменьшение морфологических показателей деревьев и на увеличение исследованных анатомических показателей хвои статистически значимое влияние оказывало недостаточное содержание в субстрате: общего органического углерода, Ca, Mg, фосфора и гигровлаги. Низкий уровень гигровлаги и фосфора в субстрате активизировали синтез пролина и аскорбиновой кислоты в хвое. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при оценке состояния древесных растений и при проведении лесовосстановительных работ на нарушенных промышленностью землях.

Ключевые слова: *ель сибирская, анатомо-морфологическое строение, адаптивные реакции, антиоксиданты, промышленные отвалы*

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема Государственного задания FEUZ-2023-0019.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Анатомо-морфологические и биохимические показатели *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал) // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 294-309. – *Библиогр.: с. 304-308 (33 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17.

Поступила 02.10.2025. ***Пересмотрена*** 10.11.2025. ***Принята*** 12.12.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Picea obovata* Ledeb. in Plantings on a Dredge Dump After Gold Mining (Middle Urals)

Nadezhda V. Chukina[1]✉, nady_dicusar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5517-0240
Natalia V. Lukina[1], natalia.lukina@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-6425-6214
Elena I. Filimonova[1], Elena.Filimonova@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-6937-0139
Margarita A. Glazyrina[1], Margarita.Glazyrina@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8258-270X

[1]*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira str., 19, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation*

Abstract

Due to of intensive anthropogenic impact on natural ecosystems, the study of the adaptive capabilities of woody plants used in the reclamation of industrial waste dumps is of particular importance. The aim of the research was to study the anatomical, morphological, and biochemical characteristics of 22-year-old *Picea obovata* Ledeb. on the waste heap after gold mining in the Sverdlovsk region. Morphological parameters were measured in the field condi-tions. Anatomical parameters were magnified in cross-sections using the SIAMS MesoPlant image processing system. Lipid peroxidation levels and the content of low-molecular-weight antioxidants (proline, ascorbic acid, and phenolic compounds) in the needles were analyzed using standard spectrophotometric methods. On the waste heap after gold mining without measures to improve the substrate properties, *P. obovata* Ledeb. trees experienced a decrease in height, trunk diameter at the root collar, branch growth, and needle length. The photosynthetic apparatus responses to stress by the increasing of needle cross-section area, central cylinder area, and the resin duct total area, the thickening of the epidermal tissue. In adverse condition of dump the increased level of lipid peroxidation, accompanied by the accumulation of proline and ascorbic acid in needle have been shown. Correlation analysis revealed that the decrease in tree morphological parameters and the increase in studied anatomical parameters of needles were significantly affected by the insufficient content of total organic carbon, Ca, Mg, phosphorus, and moisture in the substrate. The increases in proline and ascorbic acid content in needles occurred with decreased of hygromoisture and phosphorus content in the substrate. These experimental data can be used to assess the condition of woody plants and during reforestation of industrial disturbed areas.

Keywords: *Picea obovata, anatomical and morphological structure, adaptive reactions, antioxidants, industrial waste*

Funding: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the topic of the State Assignment FEUZ-2023-0019.

Acknowledgments: authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

For citation: Chukina N.V., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. (2025). Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Picea obovata* Ledeb. in Plantings on a Dredge Dump After Gold Mining (Middle Urals). Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 294-309 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17.

Received 02.10.2025. ***Revised*** 10.11.2025. ***Accepted*** 12.12.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Интенсивное освоение месторождений золота приводит к резкому увеличению площадей открытых разработок, которые находятся в основном в долинных ландшафтах, выполняющих важные средорегулирующие функции. Для разработки россыпей золота чаще всего используют дражный и гидравлический способы, приводящие к образованию отвалов, сложенных галечно-валунно-глыбовым, песчано-гравийно-галечным или песчано-глинистым материалом, полностью лишенных растительности, и по сути своей представляющих промышленные пустыни [1].

Для ускорения восстановления продуктивности нарушенных земель, а также в целях оптимизации ландшафта на Урале часто рекомендуется лесохозяйственное направление биологической рекультивации [2–4]. Примеры лесовосстановления на таких территориях имеются и за рубежом [5].

Искусственное лесовосстановление требует тщательного подбора устойчивых видов, способных адаптироваться к экстремальным условиям среды [3, 6]. Одним из таких видов является ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb., Pinaceae Lindl.) – ключевой вид бореальной зоны [7–9]. Вид широко распространен на Урале [10], встречается преимущественно в разреженных кустарниково-зеленомошных лесах, типичных для северной и средней частей северной тайги [7]. *P. obovata* представляет значительный интерес для рекультивации благодаря своей экологической пластичности, относительной нетребовательности к условиям внешней среды и способности формировать устойчивые насаждения [11, 12].

Неблагоприятные условия среды техногенно нарушенных территорий, такие как дефицит минерального питания и органического вещества в субстрате, низкая влагоёмкость, а также высокий уровень инсоляции вызывают у растений стресс [13–16], приводящий к изменению их анатомо-морфологической структуры и биохимических процессов.

Маркерной реакцией растений на стресс является усиление процессов перекисного окисления липидов и, как следствие, активация антиоксидантной системы [17, 18]. Адаптивной реакцией растений на стрессовые условия является накопление защитных соединений, таких как низкомолекулярные антиоксиданты. Например, такие метаболиты растений, как фенольные соединения, аскорбиновая кислота и пролин, играют важную роль в защите растений от окислительного стресса [19, 20]. Как показывают исследования, виды растений, колонизирующие нарушенные местообитания, обладают высоким антиоксидантным статусом, что позволяет им выживать в неблагоприятных условиях среды [21].

Однако биохимические и морфофизиологические особенности *P. obovata* в условиях дражных отвалов остаются недостаточно изученными, что затрудняет прогнозирование успешности использования данного вида в рекультивационных мероприятиях. Изучение влияния экологических условий на рост и сохранность насаждений *P. obovata* на отвалах, а также на анатомо-морфологические и биохимические показатели деревьев, имеет важное значение для разработки научных основ лесохозяйственной рекультивации. Однако комплексных исследований реакции растений *P. obovata*, произрастающих на нарушенных территориях не проводилось, что и определило актуальность данной работы.

Цель работы – анализ морфологических характеристик *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал), выявление влияния свойств субстрата на анатомо-морфологические и биохимические параметры хвои.

Материалы и методы

Объекты и методы исследования

Сроки и объект исследований. Исследования проводились в июне 2024 года. Объектом изучения послужили опытные лесные культуры Picea obovata Ledeb., созданные в 2003 году на территории дражного отвала после проведения золотодобычных работ.

Район работ. Участок расположен на месте бывшего месторождения Увальное, которое находится в 4 км на северо-восток от г. Невьянска Свердловской области (57°31′31″ с. ш.; 60°16′01″ в. д.).

Характеристика района исследований. Район относится к таежной зоне, подзоне южной тайги, и расположен в пределах низкогорной полосы Среднего Урала. Климат континентальный, с продолжительной холодной зимой (5–6 месяцев) и коротким относительно теплым летом (3 месяца). Анализ современных климатических тенденций показал, что за пятилетний период с 2019 по 2023 гг. сумма эффективных температур увеличилась с 1832,9 °С до 2449,4 °С. Одновременно с этим зафиксировано сокращение суммы годовых осадков с 504 мм до 367 мм, а также суммы осадков за теплое время года с 341 мм до 184 мм [22]. В почвенном покрове распространены подзолистые и дерново-подзолистые почвы, характеризующиеся невысоким содержанием азота, фосфора и кальция.

В ходе обследования отвала было установлено, что в процессе технического этапа рекультивации, связанного с планировкой поверхности, на дневную поверхность был поднят грунт, характеризующийся неоднородным гранулометрическим составом. Представленный материал варьирует от лёгкого до тяжёлого суглинка с включениями щебня и гальки [23].

Методика закладки эксперимента

Посадочным материалом послужили 2-летние сеянцы P. obovata, высаженные на выровненную поверхность отвала и склоны дамб рядовым способом без применения мелиорантов. Схема посадки предусматривала расстояние между сеянцами в ряду 0,5–0,7 м и междурядья 2,0–2,3 м. Общая площадь созданных лесных культур составила 3,8 га.

Для детального изучения морфофизиологических особенностей P. obovata в различных условиях местообитания была заложена система пробных площадок. В пределах отвала были заложены три опытные площадки (ОП1–ОП3) площадью 100 м² каждая. Дополнительно одна площадка (ОП4) была организована на дамбе отвала, сложенной вскрышными породами, и одна контрольная площадка (КП) – на слабонарушенной территории, прилегающей к дамбе. Отбор площадок осуществлен с целью охвата разнообразия состояния древостоя и физико-химических характеристик субстратов.

Сбор данных

Для исследования на каждой ОП и КП у 10 модельных деревьев *P. obovata* (возраст 22 года) измеряли следующие показатели: высоту дерева, годичный линейный прирост ствола и ветвей, диаметр ствола (у корневой шейки). Измерения высоты и линейных приростов проводили с помощью металлической измерительной рулетки, диаметр измеряли с помощью мерной вилки. С каждого дерева отбирали полностью сформированную двухлетнюю хвою для дальнейшего анализа. Длину хвои измеряли на свежесобранном материале, для чего хвоинки (по 30 шт. с каждой ОП) выкладывали на миллиметровую бумагу и фотографировали.

Измерение линейных параметров хвои с точностью до 0.01 мм выполняли по цифровым фотографиям с использованием системы анализа изображений SIAMS MesoPlant («СИАМС», г. Екатеринбург).

Анатомические исследования проводили на образцах хвои, фиксированных в 70% этиловом спирте. С помощью замораживающего микротома МЗ-2 изготавливали серию поперечных срезов, которые анализировали под световым микроскопом Liventhuk с цифровой фотонасадкой.

На полученных микропрепаратах измеряли следующие параметры:

– площадь поперечного сечения хвои;
– площадь центрального цилиндра;
– толщину покровных тканей (эпидермиса и гиподермы);
– количество и диаметр смоляных ходов.

Все анатомические измерения выполняли с 30-кратной повторностью с использованием системы анализа изображений SIAMS Mesoplant («СИАМС», г. Екатеринбург).

Навески свежей хвои (0,2 г) замораживали в жидком азоте для последующего определения

биохимических параметров. Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали по реакции малонового диальдегида (МДА) с тиобарбитуровой кислотой (ТБК), используя грубый экстракт хвои в растворе ТБК в 10% трихлоруксусной кислоте. Для определения общего содержания фенольных соединений навеску мелкоизмельченной хвои выдержали в растворе 70%-ного этанола в течение 24 часов, в темноте. Общее содержание фенолов определяли с помощью реактива Фолина–Чокалтеу. Содержание аскорбиновой кислоты определяли, измеряя экстракт хвои после растирания в 2% растворе метафосфорной кислоты при длине волны 265 нм. Содержание в хвое пролина определяли с использованием ациднингидринового реактива в водном экстракте. Анализ содержания МДА и низкомолекулярных антиоксидантов проводили с использованием спектрофотометра PD-303 UV (Apel, Япония). Подробное описание методик представлено в статье [21].

Биохимические параметры определяли в 4-х биологических повторностях и 5–10 аналитических повторностях. Все показатели представлены в расчете на сухой вес (с.в.) хвои.

Отбор проб субстрата проводили на каждой ОП и КП с глубины 0–20 см. Основные физико-химические характеристики субстратов определяли общепринятыми методами [24]. Содержание общего органического углерода – по Тюрину; pH – потенциометрически в водном растворе (1:2,5 по массе/объему). Обменные ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} определяли титрометрическим методом; содержание подвижного фосфора (P_2O_5) – спектрофотометрическим методом; гигроскопическую влажность – методом высушивания, при 105 °C в сушильном шкафу.

Анализ данных

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2019 и STATISTICA 10. Для оценки достоверности межгрупповых различий применяли непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Анализ агрохимических показателей субстратов с исследованных участков дражного отвала (ОП1–ОП4) и контрольного участка (КП) показал, что по величине pH субстраты были слабокислые или нейтральные.

Субстраты с отвала (ОП1–ОП3) характеризовались низким содержанием органического углерода, гигровлаги, кальция, магния и подвижных форм фосфатов по сравнению с КП. В них также отмечено более низкое содержание гигровлаги по сравнению с контрольным участком. Агрохимические показатели субстрата с дамбы отвала (ОП4) занимали промежуточное положение между образцами с отвала и контролем (табл. 1).

Анализ морфологических параметров *P. obovata*, произрастающей в условиях дражного отвала, выявил статистически значимые различия между контрольными и опытными образцами по ряду признаков, таких как: высота дерева, диаметр ствола (у корневой шейки), линейный годичный прирост ствола и ветвей, длина хвои (рис. 1).

Согласно данным С.А. Мамаева (1983) [10], на дерново-подзолистых почвах южной тайги рост *P. obovata* до 10–15 лет происходит относительно медленно, и высота деревьев к концу этого периода составляет 210–280 см. Затем наблюдается ускорение темпов роста. В возрасте около 25 лет средняя высота деревьев достигает 700–900 см.

Таблица 1

Агрохимические показатели субстратов опытных и контрольных площадок

Table 1

Agrochemical indicators of the substrates in experimental and control sites

Площадка | Experimental site	pH_{H2O}	Общий органический углерод, % | Total organic carbon, %	Гигровлага, % | Hygroscopic moisture, %	Ca^{2+}	Mg^{2+}	P_2O_5 мг/100 г | P_2O_5 mg/100 g
				мг-экв/ 100 г | mg-eq/100 g		
ОП1 | ES1	7,04	0,07	1,81	2,7	1,5	0,80
ОП2 | ES2	6,92	0,07	1,68	2,6	1,1	0,36
ОП3 | ES3	6,54	0,37	3,39	5,7	2,2	0,49
ОП4 | ES4	6,31	0,60	3,43	6,3	2,6	2,35
КП | CS	6,42	1,45	5,48	14,2	4,8	19,14

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations.

Анализ высотных показателей 22-летних особей *P. obovata* выявил существенную вариабельность в зависимости от условий местообитания. На территории дражного отвала средняя высота растений варьировала от 53,1±3,1 см на пробной площадке ОП1 до 119,1±16,0 см на площадке ОП3. На дамбе отвала (ОП4) данный показатель был значимо выше и составлял 300,0±23,0 см.

Наибольшие значения высоты отмечены на контрольной площадке (КП), где средний показатель достигал 450,0±31,0 см. Таким образом, в условиях контроля высота древостоя в среднем в 3,5 раза превышала аналогичный параметр у растений, произрастающих непосредственно на отвале.

В условиях отвала (ОП1–ОП3) P. obovata, относится к Va классу бонитета, а на ОП4 и КП – к IV классу бонитета.

Средний диаметр ствола деревьев у корневой шейки на ОП1–ОП4 варьировал в пределах от 2,2 до 4,0 см, а на КП достигал 11,0 см при средних значения 7,0 см (рис. 1).

На ОП1–ОП3 было выявлено статистически значимое ($p<0,05$) снижение средних показателей линейного годичного прироста как ствола, так и ветвей деревьев, по сравнению с деревьями на ОП4 и КП. Прирост ветвей изменялся в пределах от 1,9±0,1 см (ОП1) до 2,9±0,2 см (ОП3), на дамбе и КП он составлял 13,4±1,4 см и 13,7±0,4 см соответственно. Линейный прирост ствола варьировал от 0,9±0,1 см (ОП1) до 3,1±0,3 см (ОП3), а в контроле – 22,5±2,5 см (рис. 1).

В условиях отвала (ОП1–ОП3) выявлено статистически значимое ($p<0,05$) снижение длины хвои в 1,2–1,8 раза по сравнению с контролем. На ОП4 и КП длина хвои не отличалась между собой, составляя 11,7±0,2 мм и 11,8±0,2 мм соответственно (табл. 2). Полученные значения соответствуют литературным данным [10].

Многие авторы отмечают, что в стрессовых условиях реакция растений направлена на выживание и выход из-под действия стрессового фактора: уменьшение расходов органического вещества на рост и снижение площади листьев [11, 25].

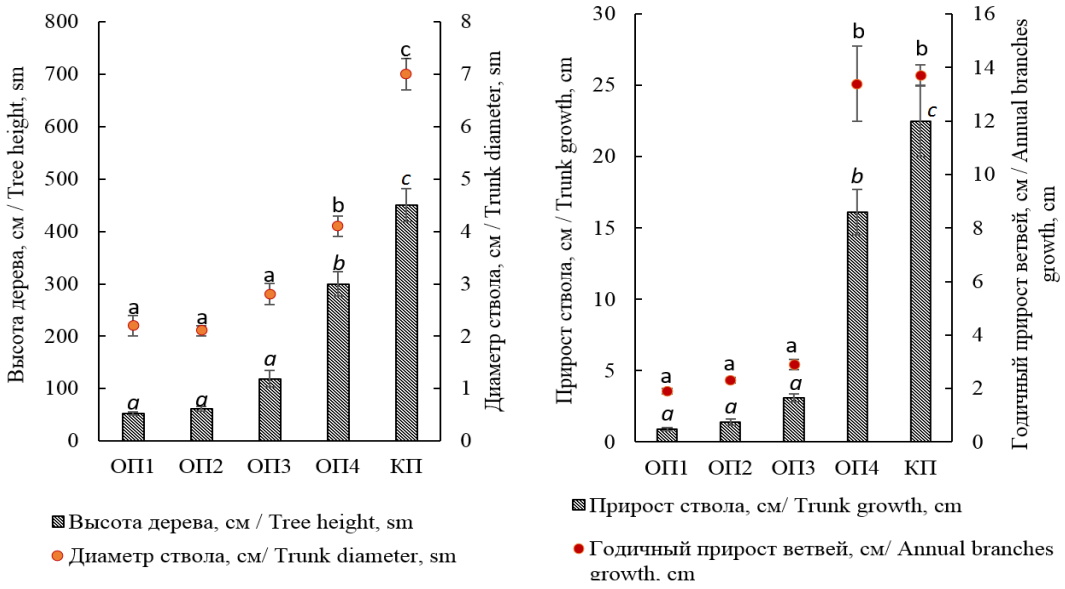


Рисунок 1. Морфологические характеристики посадок *Picea obovata* Ledeb. на отвале после золотодобычи месторождения Увальное (ОП) и в контроле (КП): a, b, c, d – разные буквы указывают на достоверные различия изученных параметров между исследованными участками при уровне значимости $p<0,05$.

Figure 1. Morphological characteristics of *Picea obovata* Ledeb. plantings on the waste heap after gold mining at Uvalnoye deposit (ES) and in the control (CS): a, b, c, d – different lletters indicate significant differences in the studied parameters between the investigated areas at a significance level of $p<0,05$.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов.

Source: own experimental data.

Непараметрический корреляционный анализ Спирмена продемонстрировал достоверное ($p<0,05$) влияние агрохимического состава субстратов: содержания гигровлаги, общего органического углерода, кальция, магния, фосфора на изученные морфологические показатели *P. obovata*: высоту особей (r=0,88; r=0,81; r=0,88; r=0,88; r=0,83 соответственно), диаметр ствола (r=0,83; r=0,93; r=0,83; r=0,83; r=0,88), длину хвои (r=0,97; r=0,97; r=0,97; r=0,97). Выявлена также статистически значимая отрицательная связь между значениями pH субстрата, длиной хвои (r=-0,93), и приростом ветвей (r=-0,94).

Известно, что хвоя отличается от плоских листьев лиственных деревьев не только внешней формой, но и рядом особенностей внутреннего строения. Изменение параметров фотосинтетического аппарата хвойных под воздействием ряда экологических факторов может являться индикатором состояния растений и нередко используется в целях фитоиндикации и биомониторинга окружающей среды [26, 27].

По результатам анализа анатомического строения хвои *P. obovata* установлено, что на участках отвала ОП1–ОП3 по сравнению с КП наблюдалось статистически значимое увеличение площади поперечного сечения, центрального цилиндра, мезофилла, а также толщины покровных тканей: эпидермы и гиподермы (табл. 2).

Как установлено в предыдущих исследованиях, смоляносная система хвои голосеменных растений выполняет важную защитную функцию. Для хвои P. obovata в норме характерно развитие двух смоляных ходов, однако в условиях затенения может наблюдаться редукция данной системы до одного хода или его полного отсутствия [10]. Помимо светового режима, модификация количества смоляных ходов отмечается при значительном загрязнении атмосферы [13].

Проведенный анализ показал, что в условиях дражного отвала также происходит значимая трансформация смоловыделяющей системы. В отличие от нормы, у исследуемых растений зафиксировано статистически достоверное увеличение как количества, так и суммарной площади поперечного сечения смоляных ходов. Полученные данные позволяют предположить, что данный морфофизиологический ответ является адаптивной реакцией на комплексный стрессовый фактор среды обитания (табл. 2).

Таблица 2

Анатомические характеристики хвои *P. obovata* Ledeb. в посадках на отвале Увального месторождения россыпного золота (ОП) и в контроле (КП)

Table 2

Anatomical characteristics of *P. obovata* Ledeb. needles on the waste heap after gold mining at Uvalnoye deposit (ES) and in the control (CS)

Параметр | Parameter	ОП1 | ES1	ОП2 | ES2	ОП3 | ES3	ОП4 | ES4	КП | CS
Длина хвои, см | Needle length, sm	0,72±0,04a	0,68±0,04a	0,95±0,07b	1,17±0,03c	1,18 ±0,02c
Площадь поперечного сечения хвои, мм^2 | Needle cross-section area, mm^2	0,485±0,029cd	0,498±0,021d	0,444±0,012c	0,333±0,012a	0,382±0,014b
Площадь центрального цилиндра, мм^2 | Central cylinder area, mm^2	0,040±0,003c	0,042±0,002c	0,039±0,002bc	0,029±0,001a	0,036±0,002b
Площадь мезофилла, мм^2 | Mesophyll area, mm^2	0,350±0,023cd	0,340±0,026c	0,324±0,009c	0,239±0,009a	0,274±0,010b
Площадь смоляного хода, мм^2 | Resin duct area, mm^2	0,013±0,001b	0,016±0,001c	0,007±0,001a	0,005±0,001a	0,007±0,001a
Число смоляных ходов, шт. | Number of resin duct	1,3±0,2b	0,9±0,2b	1,1±0,3b	0,4±0,1a	0,4±0,1a
Площадь смолоносной системы, мм^2 | Resin duct total area, mm^2	0,019±0,003bc	0,028±0,003c	0,011±0,002b	0,005±0,001a	0,007±0,001a
Т эпидермы, мкм | Epidermis thickness, µm	12,4±0,3a	14,1±0,3c	13,1±0,4b	12,3±0,2a	11,9±0,2a
Т гиподермы, мкм | Hypodermis thickness, µm	16,4±0,4c	16,5±0,4c	15,4±0,6b	14,1±0,3a	14,0±0,3a

Примечание: Разные буквы (a, b, c, d) указывают на достоверные различия изученных параметров между исследованными участками при уровне значимости $p<0,05$.

Note: Different letters (a, b, c, d) indicate significant differences in the studied parameters between the investigated areas at a significance level of $p<0,05$.

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations.

Среди изученных анатомических параметров хвои *P. obovata* наибольшей стабильностью характеризовались относительные показатели: отношение площади центрального цилиндра к общей площади поперечного сечения хвои и отношение площади мезофилла к общей площади поперечного сечения. Средние значения данных показателей для растений на опытных (ОП) и контрольной (КП) площадках составили 8,7% и 71,3% соответственно, не выявив статистически значимых межгрупповых различий.

Полученные результаты свидетельствуют о консервативном характере соотношения проводящих и ассимиляционных тканей в структуре

хвои *P. obovata*. Стабильность данных соотношений, сохраняющаяся в различных условиях произрастания, подчеркивает их важную роль в поддержании базовых физиологических функций хвои.

Согласно имеющимся в литературе данным, в стрессовых условиях среды у растений активизируются процессы перекисного окисления липидов, что приводит к увеличению в тканях одного из продуктов этой реакции – малонового альдегида [28]. Нередко у растений в условиях высоких техногенных нагрузок регистрируется повышение ПОЛ и это рассматривается как индикаторная реакция растений [23, 29].

Результаты исследований показали, что на всех опытных участках отвала (за исключением ОП4) в хвое растений *P. obovata* уровень ПОЛ был достоверно выше (в среднем в 1,7 раза), чем в контроле. При этом максимальное содержание малонового альдегида было выявлено в хвое растений с ОП1, что указывает на наименее благоприятные условия на данном участке. В хвое растений с КП, напротив, обнаружен минимальный уровень ПОЛ (рис. 2).

Было установлено, что усиление процессов ПОЛ в хвое *P. obovata* сопровождалось синтезом низкомолекулярных антиоксидантов, таких как пролин, аскорбиновая кислота и фенольные соединения. Данные метаболиты имеют различные механизмы антиоксидантного действия и могут как непосредственно препятствовать развитию окислительного стресса, инактивируя образующиеся активные формы кислорода, так и участвовать в устранении его последствий [16, 30].

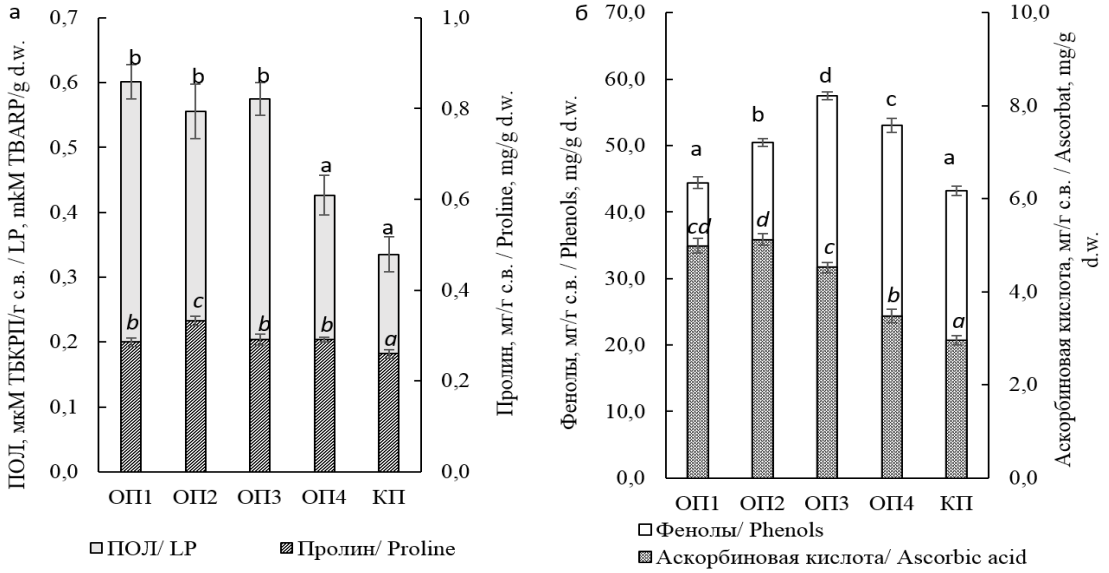


Рисунок 2. Уровень ПОЛ и содержание пролина (а), общих фенольных соединений и аскорбиновой кислоты (б) в хвое посадок *Picea obovata* Ledeb. на отвале после золотодобычи месторождения Увальное (ОП) и в контроле (КП): a, b, c, d – разные буквы указывают на достоверные различия изученных параметров между исследованными участками при уровне значимости $p<0,05$.

Figure 2. The level of LPO and the content of proline (a), total phenolic compounds and ascorbic acid (b) in the needles of *Picea obovata* Ledeb. plantings on the waste heap after gold mining at Uvalnoye deposit (ES) and in the control (CS): a, b, c, d – different letters indicate significant differences in the studied parameters between the investigated areas at a significance level of $p<0,05$.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов.

Source: own experimental data.

Проведенные исследования выявили достоверное повышение содержания ключевых метаболитов стрессовой защиты в хвое *P. obovata*, произрастающей на отвальных участках (ОП1–ОП4), по сравнению с контрольными растениями (КП). У опытных образцов зафиксировано увеличение концентрации свободного пролина, аскорбиновой кислоты и общих фенольных соединений (рис. 2).

Полученные данные согласуются с результатами наших предыдущих исследований, которые демонстрируют активацию синтеза антиоксидантов у растений в условиях техногенного стресса [21, 23]. Наблюдаемый биохимический ответ представляет собой универсальную защитно-приспособительную реакцию, что подтверждается также исследованиями других авторов [15, 31-33]. Усиление антиоксидантной защиты, по-видимому, является важным физиологическим механизмом, обеспечивающим выживание и рост *P. obovata* в нарушенных промышленных ландшафтах.

Корреляционный анализ выявил статистически значимые ($p<0,05$) обратные зависимости между анатомическими параметрами хвои P. obovata и агрохимическими характеристиками субстрата. Установлены сильные отрицательные корреляции между содержанием в субстрате общего углерода и площадью поперечного сечения хвои (r = -0,87), площадью центрального цилиндра (r = -0,87), площадью мезофилла (r = -0,87), а также общей площадью смоловыделяющей системы (r = -0,82).

Аналогичная зависимость наблюдалась между изученными анатомическими показателями и содержанием гигроскопической влаги (r = -0,90; -0,90; -0,80; -0,90 соответственно), кальция (r = -0,90; -0,90; -0,80; -0,90) и магния (r = -0,90; -0,90; -0,80; -0,90).

Также выявлена отрицательная корреляция между содержанием в субстрате общего углерода, кальция, магния, гигровлаги и толщиной эпидермы (r=-0,82; r=-0,90; r=-0,90; r=-0,90 соответственно) и гиподермы (r=-0,97; r=-0,99; r=-0,99; r=-0,99).

Анализ корреляционной связи между агрохимическими показателями субстратов и параметрами антиоксидантной системы хвои изученных растений *P. obovata* выявил влияние недостатка фосфора в субстрате отвала на содержание пролина (r=-0,90) и аскорбиновой кислоты (r=-0,90) в хвое, а также влияние недостатка гигровлаги на накопление аскорбиновой кислоты (r=-0,97).

Заключение

Проведенные исследования морфофизиологических особенностей *Picea obovata* Ledeb. на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал) показали, что свойства субстрата (слабая влагоудерживающая способность, низкое содержание органического вещества, недостаток кальция, магния и фосфора) оказывали существенное влияние на рост деревьев и формирование их ассимиляционного аппарата. Без улучшения свойств субстрата в условиях отвала происходило уменьшение высоты деревьев, годичного линейного прироста ствола и ветвей, диаметра ствола. У растений *P. obovata* на участках отвала наблюдалось уменьшение длины и площади поперечного сечения хвои. В условиях отвала в хвое происходило также увеличение площади ассимиляционных тканей, общей площади смоляносной системы, утолщение покровных тканей, что является защитной адаптивной реакцией вида к стрессовым факторам среды. Неблагоприятные характеристики субстратов привели к увеличению процессов перекисного окисления липидов в хвое *P. obovata*, что сопровождалось накоплением пролина, флавоноидов и аскорбиновой кислоты. Активация системы антиоксидантной защиты позволяет адаптироваться данному виду к техногенным условиям среды. Результаты работы могут быть использованы при оценке состояния древесных растений и при проведении лесовосстановительных работ на промышленных отвалах.

Список литературы

1. Петров А.И., Котова В.С., Осипенко Р.А., Залесов С.В. Лесохозяйственное направление рекультивации полигонов добычи рассыпного золота // Леса России и хозяйство в них. – 2023. – № 2(85). – С. 16-23. – DOI: https://doi.org/10.51318/FRET.2023.37.61.002

2. Залесов С.В., Зарипов Ю.В., Залесова Е.С. Естественная рекультивация отвала вскрышных пород и отходов обогащения асбестовой руды // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 3(157). – С. 35-38. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29220511

3. Трещевская Э.И., Панков Я.В., Трещевская С.В., Тихонова Е.Н. Культуры сосны обыкновенной на деградированных и техногенно нарушенных землях ЦЧР. – Воронеж: Изд-во ВГЛТУ, 2017. – 31 с. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29307651

4. Лантинова А.В., Марина Н.В., Агапитов Е.М., Рогачев В.Е., Фомин В.В. Влияние аморфного кремнезема на рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивируемом гранитном карьере // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 4(56). – С. 38-49. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-962/2024.4/3

5. Mena-Quintana F.N., Álvarez W., Franco W., Moncayo L., Tipán M., Ayala J. Land Degraded by Gold Mining in the Ecuadorian Amazon: A Proposal for Boosting Ecosystem Restoration Through Induced Revegetation. Forests. 2025; 16: 372. – DOI: 10.3390/ f16020372

6. Suárez-Muñoz M., Bonet-García F.J., Navarro-Cerrillo R., Herrero J., Mina M. Forest management scenarios drive future dynamics of Mediterranean planted pine forests under climate change. Landscape Ecology. 2023; 38: 2069-2084. – DOI: https://doi.org/10.1007/s10980-023-01678-y

7. Orlova L., Gussarova G., Glazkova E., Egorov A., Potokin A., Ivanov S. Systematics and distribution of spruce species in the North-West of Russia. Dendrobiology. 2020; 84: 12-29. – DOI: 10.12.657/denbio.084.002

8. Leites L., Garzón M. B. Forest tree species adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. Glob. Change Biol. 2023; 29(17): 4711-4730. – DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.16711

9. Zhou Q., Karunarathne P., Andersson-Li L., Chen C., Opgenoorth L., Heer K., Piotti A., Vendramin G.G., Nakvasina E., Lascoux M., Milesi P. Recurrent hybridization and gene flow shaped Norway and Siberian spruce evolutionary history over multiple glacial cycles. Molecular Ecology. 2024; 33(17): e17495. – DOI: https://doi.org/10.1111/mec.17495

10. Мамаев С.А. Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 112 с. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26807083

11. Демина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменчивость показателей ассимиляционного аппарата климатипов ели в географических культурах Республики Коми // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 42-50. – DOI: https://doi.org/10.17238/issn 2227-6572.2016.2.42

12. Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European north of Russia. Central European Forestry Journal. – 2019. – V. 65, N 2. – P. 121-128. – DOI: https://doi.org/10.2478/forj-2019-0012

13. Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // Биосфера. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 86–100. – DOI: https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i3.578

14. Gupta R., Verma N., Tewari R.K. Micronutrient deficiency-induced oxidative stress in plants. Plant Cell Rep. 2024; 43(9): 213. – DOI: https://doi.org/10.1007/s00299-024-03297-6

15. Spormann S., Nadais P., Sousa F., Pinto M., Martins M., Sousa B., Fidalgo F., Soares C. Accumulation of Proline in Plants under Contaminated Soils–Are We on the Same Page? Antioxidants. 2023; 12(3): 666. – DOI: https://doi.org/10.3390/antiox12030666

16. Rao M.J., Duan M., Zhou C., Jiao J., Cheng P., Yang L., Wei W., Shen Q., Ji P., Yang Y., Conteh O., Yan D., Yuan H., Rauf A., Ai J., Zheng B. Antioxidant Defense System in Plants: Reactive Oxygen Species Production, Signaling, and Scavenging During Abiotic Stress-Induced Oxidative Damage. Horticulturae. 2025; 11(5): 477. – DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae11050477

17. Liang X., Qian R., Wang D., Liu L., Sun C., Lin X. Lipid-Derived Aldehydes: New Key Mediators of Plant Growth and Stress Responses. Biology. 2022; 11(11): 1590. – DOI: https://doi.org/10.3390/biology11111590

18. Chakraborty N., Mitra R., Dasgupta D., Ganguly R., Acharya K., Minkina T., Popova V., Churyukina E., Keswani C. Unraveling lipid peroxidation-mediated regulation of redox homeostasis for sustaining plant health. Plant Physiology and Biochemistry. 2024; 206: 108272. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108272.

19. Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. Front. Plant Sci. 2023; 14: 1110622. – DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622

20. Fathi A., Shiade S.R.G., Saleem A., Shohani F., Fazeli A., Riaz A., Zulfiqar U., Shabaan M., Ahmed I., Rahimi M. Reactive Oxygen Species (ROS) and Antioxidant Systems in Enhancing Plant Resilience Against Abiotic Stress. International Journal of Agronomy. 2025; 8834883. – DOI: https://doi.org/10.1155/ioa/8834883

21. Maleva M., Borisova G., Filimonova E., Lukina N., Chukina N., Ermoshin A., Tugbaeva A., Voropaeva O. Adaptive Redox Reactions Promote Naturalization of Rare Orchid Epipactis atrorubens on Serpentine Dumps Post Asbestos Mining. Horticulturae. 2022; 8(7): 603. – DOI: https://doi.org/10.3390/ horticulturae8070603

22. Погода и климат. – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/28344.htm (дата обращения: 20.10.2024).

23. Лукина Н.В., Чукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П., Борисова Г.Г. Морфофизиологические особенности *Pinus sylvestris* L. в искусственных насаждениях на дражном отвале после золотодобычи. – Текст: электронный // Лесохозяйственная информация. – 2022. – № 3. – С. 145-157. – DOI: https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13

24. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – Москва: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.

25. Вернигора Е.Г., Бурундукова О.Л. Мезоструктура фотосинтетического аппарата в стрессовых условиях роста // Тихоокеанский медицинский журнал. – 2015. – № 2. – С. 24-26.

26. Amirmohammadi M., Khademi H., Shamsollah A., Faz A. Pine needles as bioindicator and biomagnetic indicator of selected metals in the street dust, a case study from southeastern Iran. Chemosphere. 2024; 352: 141281. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141281

27. Al Sayegh Petkovsek S., Batic F., Ribaric Lasnik C. Norway spruce needles as bioindicator of air pollution in the area of influence of the Sostanj Thermal Power Plant, Slovenia. Environ Pollut. 2008; 151(2): 287-291. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.036.

28. Anjum N.A., Sofo A., Scopa A., Roychoudhury A., Gill S.S., Iqbal M., Lukatkin A.S., Pereira E., Duarte A.C., Ahmad I. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. Environmental Science and Pollution Research. 2015; 22: 4099-4121. – DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1

29. Неверова О.А., Легощина О.М., Быков А.А. Оценка интенсивности окислительных процессов у древесных растений в зоне действия промышленных выбросов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1(3). – С. 776-779. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15624737

30. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. Plant Signaling and Behavior. 2012; 7(11): 1456-1466. – DOI: https://doi.org/10.4161/psb.21949

31. Зарипова Р.С., Кузьмин П.А. Влияние антропогенного стресса на динамику аскорбиновой кислоты в растениях // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2015. – Т. 2, № 5. – С. 24-26. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23484817

32. Афанасьева Л.В., Кашин В.К. Химический состав и продуктивность *Vaccinium myrtillus* L. в условиях техногенного воздействия // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 333-346. – DOI: https://doi.org/10.17516/1997-1389-2015-8-3-333-346

33. Pasqualini V., Robles C., Garzino S., Greff S., Bousquet-Melou A., Bonin G. Phenolic compounds content in *Pinus halepensis* Mill. needles: a bioindicator of air pollution. Chemosphere. 2003; 52(1): 239-248. – DOI: https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00268-6

34. References

1. Petrov A.I., Kotova V.S., Osipenko R.A., Zalesov S.V. *Lesoxozyajstvennoe napravlenie rekul`tivacii poligonov doby`chi rassy`pnogo zolota* [Forestry direction in reckamation of alluvial gold mining sites]. Lesa Rossii i xozyajstvo v nix = Forest of Russia and economy in them. 2023; 2(85): 16-23. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.51318/FRET.2023.37.61.002

2. Zalesov S.V., Zaripov Ju.V., Zalesova E.S. *Estestvennaya rekul`tivaciya otvala vskry`shny`x porod i otxodov obogashheniya asbestovoj rudy`* [Natural recultivation of overburden grounds dump and rock refuse of asbestos ore]. Agrarny`j vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals. 2017; 3(157): 35-38. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29220511

3. Treshchevskaya E.I., Pankov Ya.V., Treshchevskaya S.V., Tikhonova E.N. *Kul`tury` sosny` oby`knovennoj na degradirovanny`x i texnogenno narushenny`x zemlyax CzChR* [Cultures of Scots Pine on Degraded and Technologically Disturbed Lands of the Central Black Earth Region]. Voronezh. VGLTU Publishing House. 2017. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29307651

4. Lantinova A.V, Marina N.V., Agapitov E.M., Rogachev V.E., Fomin V.V. *Vliyanie amorfnogo kremnezema na rost seyancev sosny` oby`knovennoj (Pinus sylvestris L.) i eli sibirskoj (Picea obovata Ledeb.) na rekul`tiviruemom granitnom kar`ere* [Effect of amorphous silica on the growth of seedlings (*Pinus sylvestris* L.) and (*Picea obovata* Ledeb.) in a reclaimed granite quarry]. Lesotexnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal. 2024; 14(4 (56)): 38-49. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/3

5. Mena-Quintana F.N., Álvarez W., Franco W., Moncayo L., Tipán M., Ayala J. Land Degraded by Gold Mining in the Ecuadorian Amazon: A Proposal for Boosting Ecosystem Restoration Through Induced Revegetation. Forests. 2025; 16: 372. DOI: https://doi.org/10.3390/ f16020372

6. Suárez-Muñoz M., Bonet-García F.J., Navarro-Cerrillo R., Herrero J., Mina M. Forest management scenarios drive future dynamics of Mediterranean planted pine forests under climate change. Landscape Ecology. 2023; 38: 2069-2084. DOI: https://doi.org/10.1007/s10980-023-01678-y

7. Orlova L., Gussarova G., Glazkova E., Egorov A., Potokin A., Ivanov S. Systematics and distribution of spruce species in the North-West of Russia. Dendrobiology. 2020; 84: 12-29. – DOI: https://doi.org/10.12.657/denbio.084.002

8. Leites L., Garzón M. B. Forest tree species adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. Glob. Change Biol. 2023; 29(17): 4711-4730. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.16711

9. Zhou Q., Karunarathne P., Andersson-Li L., Chen C., Opgenoorth L., Heer K., Piotti A., Vendramin G.G., Nakvasina E., Lascoux M., Milesi P. Recurrent hybridization and gene flow shaped Norway and Siberian spruce evolutionary history over multiple glacial cycles. Molecular Ecology. 2024; 33(17): e17495. DOI: https://doi.org/10.1111/mec.17495

10. Mamaev S.A. *Vidy` xvojny`x na Urale i ix ispol`zovanie v ozelenenii* [Species of Conifers in the Urals and Their Use in Landscaping]. Sverdlovsk. Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences. 1983. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26807083

11. Demina N.A., Nakvasina E.N. *Izmenchivost` pokazatelej assimilyacionnogo apparata klimatipov eli v geograficheskix kul`turax Respubliki Komi* [Variability of assimilation apparatus indicators of spruce climatypes of the provenance trial plantations in the Komi Republic]. Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal`nogo universiteta. Seriya:

Estestvenny`e nauki = Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural Sciences. 2016; 2: 42-50. (In Russ.). – DOI: https://doi.org/10.17238/issn 2227-6572.2016.2.42

12. Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European north of Russia. Central European Forestry Journal. 2019; 65(2): 121-128. DOI: https://doi.org/10.2478/forj-2019-0012

13. Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. *Texnogenez i strukturno-funkcional`ny`e reakcii drevesny`x vidov: povrezhdeniya, adaptacii, strategii. Chast` 1. vliyanie na makro- i mikromorfologiyu assimilyacionnogo apparata* [Structural and functional responses of woody plantsto anthropogenic environmental changes: damage, adaptations and strategies. Part 1. Effects on the macro- and micromorphology of the assimilation apparatus]. Biosfera = Biosfera. 2021; 13(3): 86–100. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i3.578

14. Gupta R., Verma N., Tewari R.K. Micronutrient deficiency-induced oxidative stress in plants. Plant Cell Rep. 2024; 43(9): 213. DOI: https://doi.org/10.1007/s00299-024-03297-6

15. Spormann S., Nadais P., Sousa F., Pinto M., Martins M., Sousa B., Fidalgo F., Soares C. Accumulation of Proline in Plants under Contaminated Soils–Are We on the Same Page? Antioxidants. 2023; 12(3): 666. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox12030666

16. Rao M.J., Duan M., Zhou C., Jiao J., Cheng P., Yang L., Wei W., Shen Q., Ji P., Yang Y., Conteh O., Yan D., Yuan H., Rauf A., Ai J., Zheng B. Antioxidant Defense System in Plants: Reactive Oxygen Species Production, Signaling, and Scavenging During Abiotic Stress-Induced Oxidative Damage. Horticulturae. 2025; 11(5): 477. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae11050477

17. Liang X., Qian R., Wang D., Liu L., Sun C., Lin X. Lipid-Derived Aldehydes: New Key Mediators of Plant Growth and Stress Responses. Biology. 2022; 11(11): 1590. DOI: https://doi.org/10.3390/biology11111590

18. Chakraborty N., Mitra R., Dasgupta D., Ganguly R., Acharya K., Minkina T., Popova V., Churyukina E., Keswani C. Unraveling lipid peroxidation-mediated regulation of redox homeostasis for sustaining plant health. Plant Physiology and Biochemistry. 2024; 206: 108272. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108272

19. Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. Front. Plant Sci. 2023; 14: 1110622. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622

20. Fathi A., Shiade S.R.G., Saleem A., Shohani F., Fazeli A., Riaz A., Zulfiqar U., Shabaan M., Ahmed I., Rahimi M. Reactive Oxygen Species (ROS) and Antioxidant Systems in Enhancing Plant Resilience Against Abiotic Stress. International Journal of Agronomy. 2025; 8834883. DOI: https://doi.org/10.1155/ioa/8834883

21. Maleva M., Borisova G., Filimonova E., Lukina N., Chukina N., Ermoshin A., Tugbaeva A., Voropaeva O. Adaptive Redox Reactions Promote Naturalization of Rare Orchid Epipactis atrorubens on Serpentine Dumps Post Asbestos Mining. Horticulturae. 2022; 8(7): 603. DOI: https://doi.org/10.3390/ horticulturae8070603

22. Pogoda i klimat [Weather and Climate] (In Russ.). URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/28344.htm (date of access: 20.10.2024).

23. Lukina N.V., Chukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A., Uchaev A.P., Borisova G.G. *Morfofiziologicheskie osobennosti Pinus sylvestris L. v iskusstvenny`x nasazhdeniyax na drazhnom otvale po-sle zolotodoby`chi* [Morphophysiological Features of Pinus sylvestris L. in Artificial Plants on Dredge Dump after Gold Mining. – Text: electronic]. Lesoxozyajstvennaya informaciya = Forestry information. 2022; 3: 145-157. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13

24. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Guide in chemical analysis of soils]. Moscow. Izdatelstvo MGU. 1970. (In Russ.).

25. Vernigora E.G., Burundukova O.L. *Mezostruktura fotosinteticheskogo apparata v stressovy`x usloviyax rosta* [Mesostructure of photosynthetic mechanism of firs in the context of stressful growth]. Tixookeanskij medicinskij zhurnal = Pacific Medical Journal. 2015; 2: 24-26. (In Russ.).

26. Amirmohammadi M., Khademi H., Shamsollah A., Faz A. Pine needles as bioindicator and biomagnetic indicator of selected metals in the street dust, a case study from southeastern Iran. Chemosphere. 2024; 352: 141281. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141281

27. Al Sayegh Petkovsek S., Batic F., Ribaric Lasnik C. Norway spruce needles as bioindicator of air pollution in the area of influence of the Sostanj Thermal Power Plant, Slovenia. Environ Pollut. 2008; 151(2): 287-291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.036.

28. Anjum N.A., Sofo A., Scopa A., Roychoudhury A., Gill S.S., Iqbal M., Lukatkin A.S., Pereira E., Duarte A.C., Ahmad I. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. Environmental Science and Pollution Research. 2015; 22: 4099-4121. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1.

29. Neverova O.A., Legoshchina O.M., Bykov A.A. *Ocenka intensivnosti okislitel`ny`x processov u drevesny`x rastenij v zone dejstviya promy`shlenny`x vy`brosov* [Estimation of oxidative processes intensity at wood plants in the operative range of industrial emissions]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010; 12(1(3)): 776-779. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15624737

30. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. Plant Signaling and Behavior. 2012; 7(11): 1456-1466. DOI: https://doi.org/10.4161/psb.21949.

31. Zaripova R.S., Kuzmin P.A. *Vliyanie antropogennogo stressa na dinamiku askorbinovoj kisloty` v rasteniyax* [The Influence of Anthropogenic Stress on the Dynamics of Ascorbic Acid in Plants]. Mezhdunarodny`j nauchny`j zhurnal "Innovacionnaya nauka" = International Scientific Journal "Innovative Science". 2015; 2(5): 24-26. (In Russ.). URL: DOI: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23484817

32. Afanasyeva L.V., Kashin V.K. *Ximicheskij sostav i produktivnost` Vaccinium myrtillus L. v usloviyax texnogennogo vozdejstviya* [The Chemical Composition and Productivity of *Vaccinium myrtillus* L. under Influence of Industrial Pollution]. Zhurnal Sibirskogo federal`nogo universiteta. Seriya: Biologiya = Journal of Siberian Federal University. Biology. 2015; 8(3): 333-346. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17516/1997-1389-2015-8-3-333-346

33. Pasqualini V., Robles C., Garzino S., Greff S., Bousquet-Melou A., Bonin G. Phenolic compounds content in *Pinus halepensis* Mill. needles: a bioindicator of air pollution. Chemosphere. 2003; 52(1): 239-248. DOI: https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00268-6

Сведения об авторах

✉ *Чукина Надежда Владимировна* – доцент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологии Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук; г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-5517-0240, e-mail: nady_dicusar@mail.ru

Лукина Наталия Валентиновна – старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук, доцент по специальности «Экология», г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-6425-6214, natalia.lukina@urfu.ru

Филимонова Елена Ивановна – старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-6937-0139, Elena.Filimonova@urfu.ru

Глазырина Маргарита Александровна – старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук, доцент по специальности «Экология, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0001-8258-270X, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

Information about authors

✉ *Nadezhda V. Chukina* – Associate Professor of the Department of Experimental Biology and Biotechnology of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-5517-0240, e-mail: nady_dicusar@mail.ru

Natalia V. Lukina – Senior Researcher at the Laboratory "Anthropogenic Ecosystem Dynamics" of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Associate professor in the specialty «Ecology», Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-6425-6214, natalia.lukina@urfu.ru

Elena I. Filimonova – Senior Researcher at the Laboratory "Anthropogenic Ecosystem Dynamics" of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-6937-0139, Elena.Filimonova@urfu.ru

Margarita A. Glazyrina – Senior Researcher at the Laboratory "Anthropogenic Ecosystem Dynamics" of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Associate professor in the specialty «Ecology», Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0001-8258-270X, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/18

УДК 630*228.125+630*232.412.6

Продуктивность и санитарное состояние дубрав предгорий Северного Кавказа (на примере лесов Республики Адыгея)

Екатерина Н. Штепа ✉, kulakova_92@list.ru https://orcid.org/0000-0002-0111-1883

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

Цель исследования - оценка современного состояния, продуктивности и товарной структуры дубрав предгорий Северного Кавказа на примере Майкопского лесничества Республики Адыгея для разработки научно обоснованных лесохозяйственных рекомендаций. Исследования проведены на 13 постоянных пробных площадях площадью 0.25 га, заложенных в искусственных насаждениях с преобладанием дуба черешчатого (Quercus robur) и дуба Гартвиса (Quercus hartwissiana). Применялись методы перечислительной таксации, определялись основные таксационные показатели (возраст, высота, диаметр, полнота, запас). Санитарное состояние оценивалось по средневзвешенной категории с учетом породного состава, товарная структура анализировалась с использованием сортиментных таблиц. Установлено, что исследуемые дубравы характеризуются средней и высокой продуктивностью со средним запасом 85 м³/га. Максимальный запас (395,05 м³/га) отмечен в дубово-грабовых насаждениях. Дуб черешчатый идентифицирован как основная порода для получения деловой древесины (до 81 м³/га), в то время как граб кавказский доминирует в полуделовой и дровяной категориях. Санитарное состояние насаждений оценивается как ослабленное (индекс 1,57–2,37 балла). Выявлено значительное негативное влияние быстрорастущих пород (ольхи черной, осины) на санитарное состояние древостоев. На основании результатов исследований разработан комплекс лесохозяйственных мероприятий, включающий рекомендации по формированию смешанных насаждений, проведению санитарных рубок и осуществлению лесовосстановления с учетом местных почвенно-климатических условий для повышения устойчивости и продуктивности дубрав.

Ключевые слова: *Дубравы, Северный Кавказ, Республика Адыгея, дуб черешчатый, таксация, продуктивность насаждений, запас древесины, санитарное состояние, товарная структура, рубки ухода, лесовосстановление*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Штепа Е.Н. Продуктивность и санитарное состояние дубрав предгорий Северного Кавказа (на примере Республики Адыгея) / Е.Н. Штепа // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 310–326. – *Библиогр.: с. 323–325 (20 назв.)*. – https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/18.

Поступила 11.07.2025. ***Пересмотрена*** 25.03.2025. ***Принята*** 5.06.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Productivity and Sanitary Condition of Oak Forests in the Foothills of the North Caucasus (Case Study of the Republic of Adygea Forests)

Ekaterina N. Shtepa ✉, kulakova_92@list.ru https://orcid.org/0000-0002-0111-1883

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation

Research aim - assessment of the current state, productivity and merchantable structure of oak forests in the foothills of the North Caucasus using the example of the Maykopsky forestry unit of the Republic of Adygea to develop science-based forest management recommendations. The research was conducted on 13 permanent sample plots of 0.25 hectares each, established in artificial stands dominated by English oak (Quercus robur) and Hartwiss's oak (*Quercus hartwissiana%). Methods of complete enumeration and taxational assessment were used to determine the main forest inventory indicators (age, height, diameter, canopy density, growing stock). The sanitary condition was assessed using the weighted average category considering species composition; the merchantable structure was analyzed using sortiment tables. It was found that the studied oak forests are characterized by medium and high productivity with an average growing stock of 85 m³/ha. The maximum stock (395.05 m³/ha) was noted in oak-hornbeam stands. English oak was identified as the main species for obtaining merchantable wood (up to 81 m³/ha), while Caucasian hornbeam dominates in the semi-merchantable and fuelwood categories. The sanitary condition of the stands is assessed as weakened (index 1.57-2.37 points). A significant negative impact of fast-growing species (Black Alder, Aspen) on the sanitary condition of the stands was revealed. Based on the research results, a set of forest management measures has been developed, including recommendations for the formation of mixed stands, sanitation cutting, and reforestation considering local soil and climatic conditions to enhance the sustainability and productivity of oak forests.

Keywords: *Oak forests, North Caucasus, Republic of Adygea, Pedunculate oak (Quercus robur), forest inventory, stand productivity, timber stock, sanitary condition, merchantable structure, thinning, reforestation*

Funding: This research did not receive any external funding.

Acknowledgments: The author thanks the reviewers for their valuable contribution to the expert evaluation of the article.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Shtepa E.N. (2025). Productivity and Sanitary Condition of Oak Forests in the Foothills of the North Caucasus (Case Study of the Republic of Adygea Forests). Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 310–326 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/18.

Received 23.02.2025. ***Revised*** 25.03.2025. ***Accepted*** 5.06.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Дубравы предгорий Северного Кавказа представляют собой уникальные лесные экосистемы, играющие crucialроль в поддержании экологического баланса региона. Выполняя важнейшие средообразующие, водоохранные и рекреационные функции, эти леса в последние десятилетия подвергаются возрастающему воздействию комплекса негативных факторов. Особую актуальность приобретают исследования санитарного состояния и продуктивности дубрав в условиях наблюдаемых климатических изменений и усиления антропогенной нагрузки [1,2].

На примере лесов Республики Адыгея отчетливо прослеживается взаимосвязь между почвенными условиями и продуктивностью дубрав. Формируясь на плодородных почвах, эти насаждения демонстрируют высокие показатели продуктивности, однако их санитарное состояние остается уязвимым перед лицом многочисленных угроз. Среди наиболее значимых факторов риска следует отметить распространение стволовых вредителей, таких как короед, развитие грибных заболеваний, а также последствия климатических изменений, проявляющиеся в учащении засушливых периодов и изменении гидрологического режима [3,4].

Проведенные исследования в различных регионах свидетельствуют о высокой зависимости состояния дуба черешчатого (Quercus robur L.) от эдафических условий. Так, исследования в Нижнем Поволжье продемонстрировали хороший рост данного вида на каштановых и черноземных почвах, в то время как на песчаных субстратах его рост существенно замедляется [5-7].

Особое значение имеет режим увлажнения - исследования выявили четкую градацию таксационных показателей и индекса жизненного состояния в зависимости от влажности местообитаний, с максимальными значениями в гигрофильных условиях [8,9].

Современные стратегии лесовосстановления дуба черешчатого включают селекционные подходы, предполагающие исключение из селекционного процесса 25-40% родительских деревьев с наихудшими показателями [10]. Качество семенного материала также имеет фундаментальное значение, при этом исследования показывают, что наибольший урожай желудей формируется под здоровыми деревьями с хорошо развитой кроной [11,12]. Перспективным направлением является использование нетрадиционных мелиорантов, таких как обеззараженный осадок сточных вод, который положительно влияет на морфологические параметры сеянцев дуба.

В контексте управления дубравами предгорий Северного Кавказа необходим комплексный подход, учитывающий как биологические, так и экологические аспекты. Регулярные лесоводственные обследования, включающие анализ возрастной структуры, состояния деревьев и наличия вредителей, должны дополняться мониторингом антропогенного воздействия.

Разработка научно обоснованных лесохозяйственных рекомендаций для Майкопского лесничества Республики Адыгея требует учета региональной специфики и современных вызовов, связанных с изменением климата и трансформацией лесных экосистем.

Цель работы- оценка современного состояния, продуктивности и товарной структуры дубрав предгорий Северного Кавказа на примере Майкопского лесничества Республики Адыгея для разработки научно-обоснованных лесохозяйственных рекомендаций

Материалы и методы

Район и объекты исследований. Работа выполнена на территории Майкопского лесничества (Лесосеменное и Курджипское участковые лесничества) Республики Адыгея, относящейся к зоне горного Северного Кавказа, Северо-Кавказскому горному району.

Объектами исследования служили дубравы, представленные преимущественно дубом черешчатым (Quercus robur) и дубом Гартвиса (Quercus hartwissiana) с участием ясеня обыкновенного (Fraxinus excelsior), бука восточного (Fagus orientalis), граба кавказского (Carpinus caucasica), клена полевого (Acer campestre), ольхи черной (Alnus glutinosa) и осины (Populus tremula). Значительные площади заняты дубово-грабовыми насаждениями. Схема расположения объектов исследований представлена на рисунке 1.

Методика полевых исследований. Исследования основаны на методе пробных площадей в соответствии с ОСТ 56-69-83 [15]. На участках с оптимальными для дуба лесорастительными условиями (свежие дубравы D2) с преобладанием серых лесных, бурых лесных оподзоленных и дерново-карбонатных почв заложено 13 постоянных пробных площадей

(ППП) площадью 0.25 га каждая. Предварительно проведено рекогносцировочное обследование насаждений для оценки их общего состояния.



Кв. 28 Выд. 19
Qtr. 28 S.C. 19



Кв. 28 Выд. 18
Qtr. 28 S.C. 18



Кв. 28 Выд. 1
Qtr. 28 S.C. 1



Кв. 5 Выд. 14
Qtr. 5 S.C. 14



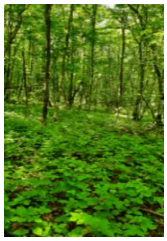
Кв. 40 Выд. 9;53
Qtr. 40 S.C. 9;53



Кв. 40 Выд. 18
Qtr. 40 S.C. 18



Кв. 40 Выд. 17
Qtr. 40 S.C. 17



Кв. 40 Выд. 20
Qtr. 40 S.C. 20



Кв. 40 Выд. 26
Qtr. 40 S.C. 26



Кв. 40 Выд. 28
Qtr. 40 S.C. 28



Кв. 40 Выд. 38
Qtr. 40 S.C. 38



Кв. 40 Выд. 41
Qtr. 40 S.C. 41



Кв. 39 Выд. 49
Qtr. 39 S.C. 49

Рисунок 1. Объекты исследования
Figure 1. Research objects
Источник: собственные данные автора
Source: authors own data
Примечание: Кв. – квартал, Выд. – выдел.
Note: Qtr. - quarter, S.C. - Subcompartment.

Программа наблюдений. На ППП выполнялся:

- сплошной перечет деревьев с распределением по породам, ступеням толщины и категориям санитарного состояния [14]
- определение основных таксационных показателей (возраст, высота, диаметр, полнота, запас) [15]

Оценка санитарного состояния. Санитарное состояние оценивали по средневзвешенной категории (Кср) с учетом доли участия пород в составе насаждения:

1.Категория санитарного состояния по породам:

$Kcp = \Sigma(Pi \times Ki) / 100,$

где Pi - доля категории санитарного состояния в % от запаса, Ki - категория состояния (1-5)

2. Средневзвешенная категория для насаждения:

$Kcp.нас. = \Sigma(Pi \times Kcpi) / 10,$

где Pi - доля участия породы в составе насаждения (в долях единицы), Kcpi - средневзвешенная категория состояния деревьев породы

Полученные значения соотносили со шкалой определения санитарного состояния лесных насаждений (таблица 1). Таксационная характеристика и санитарное состояние исследованных дубрав представлены в таблице 2.

Товарная структура дубовых насаждений определялась с использованием утвержденных сортиментных и товарных таблиц для древесных пород Северного Кавказа. Расчет показателя товарности насаждений проводился на основании соотношения объемов деловой древесины и общего запаса древостоя.

Результаты и их обсуждение

Анализ возрастной динамики продуктивности и санитарного состояния древостоев представляет существенный интерес для планирования лесовосстановительных мероприятий и организации устойчивого лесопользования. Согласно исследованиям К.Б. Лосицкого, дуб черешчатый демонстрирует высокую устойчивость в условиях предгорий, при этом ключевым лимитирующим фактором его роста выступает влагообеспеченность [16]. Наибольшая продуктивность вида наблюдается в свежих и влажных дубровах (D_2–D_3), где максимальный прирост по высоте отмечается до 46-летнего возраста с последующим ухудшением санитарного состояния.

Таблица 1
Table 1

Шкала определения санитарного состояния лесных насаждений
Scale for assessing the sanitary condition of forest stands

Индекс | Index	Санитарное состояние | Sanitary condition
1-1,5	лесные насаждения без признаков ослабления | forest stands with no signs of weakening
1,51-2,5	ослабленные лесные насаждения | weakened forest stands
2,51-3,5	сильно ослабленные лесные насаждения | severely weakened forest stands
3,51-4,5	усыхающие лесные насаждения | dying forest stands
более 4,5	погибшие лесные насаждения | dead forest stands

Таблица 2
Table 2

Таксационная характеристика и санитарное состояние дубрав
Forest stand characteristics and sanitary condition of oak stands

Кв. | Qtr.	Выд. | S.C.	Состав насаждений | Stand composition	Состав насаждений по породам | Stand composition by of the tree species	A, лет | A, years	H, м | H, m	$D_{1,3}$, см | $D_{1,3}$, cm	Бонитет | Site index Полнота | Canopy cover	Количество деревьев на ПП, штук | Number of trees per SP, pieces	Запас стволовой древесины на ПП, $м^3$ | Stock of stem wood on SP, m^3	Категория санитарного состояния | Sanitary condition category
Майкопское лесничество, Лесосеменное участковое лесничество | Maykop Forestry Unit, Forest seed district forestry										
28	19	10ДГ+Г+КЛП | 10Но+Ch+Fm	ДГ	68	20	28	II 0,7	142	85,56	1,68
			Г		20	24		5	0,87	2,20
			КЛП		20	28		3	0,83	3,0
28	18	10ДЧ+Г | 10О+Ch	ДЧ	68	19	20	II 0,7	119	97,37	1,70
			Г		18	18		6	1,39	2,67
28	1	5ДЧ3Г2КЛП | 5О3Ch2Fm	ДЧ	70	20	22	II 0,7	109	94,65	1,4
			Г		18	18		87	17,91	2,08
			КЛП		20	20		76	21,05	1,91
Майкопское лесничество, Курджипское участковое лесничество | Maykop Forestry Unit, Kurdzhipskoye District Forestry Unit										
5	14	5ДК2ДЧ1Г2ОС | 5No2O1Ch2A	ДК	50	17	20	II 0,8	23	18,86	1,91
			ДЧ		17	20		14	6,53	1,71
			Г		15	16		5	0,88	2,20
			ОС		20	28		12	9,75	2,67
40	9; 53	5ДЧ5Г+БК | 5O5Ch+Ob	ДЧ	58	17	24	II 0,8	39	20,77	1,77
			Г		16	20		41	6,18	2,22
			БК		17	22		3	1,16	2,33
40	18	4ДЧ5Г1БК | 4O5Ch1Ob	ДЧ	58	18	24	II 0,7	36	7,51	1,83
			Г		17	22		49	7,82	2,33
			БК		18	24		16	4,30	1,88
40	17	4СО2ДЧ2БК2Г | 4P2O2Ob2Ch	СО	60	21	30	II 0,7	34	16,69	2,15
			ДЧ		16	22		12	5,65	1,83
			БК		17	20		11	3,46	1,73
			Г		16	20		23	15,01	2,17
40	20	6ДЧ4Г+БК | 3O4Ch+Ob	ДЧ	57	18	24	II 0,7	42	22,78	2,00
			Г		17	22		69	12,46	2,32
			БК		18	24		2	0,49	2,00
40	26	3ДЧ5Г2БК | 3O5Ch2Ob	ДЧ	58	18	26	II 0,8	23	13,54	1,35
			Г		19	24		53	8,91	2,43
			БК		19	24		19	8,98	1,63
40	28	3ДЧ5Г2БК+ОС | 3O5Ch2Ob+A	ДЧ	58	18	26	II 0,7	16	9,45	1,44
			Г		17	24		35	5,87	2,51
			БК		18	26		10	4,97	2,10
			ОС		20	28		1	0,82	3,00
40	38	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС | 4O3Ch2Ob1Ba+A	ДЧ	58	18	26	II 0,5	13	3,90	1,85
			Г		19	24		24	4,55	2,21
			БК		18	24		7	3,36	1,71
			ОЛЧ		20	28		4	2,52	2,50
			ОС		20	28		1	0,82	4,00

40	41	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС | 4О3Ch2Ob1Ba+A	ДЧ	58	18	26	II 0,7	27	9,37	1,85
			Г		19	24		32	2,94	2,63
			БК		18	24		6	2,13	2,43
			ОЛЧ		20	28		7	1,76	2,17
			ОС		20	28		1	0,82	3,00
39	49	7СО1ДЧ1ЯО1Г+БК | 7P1O1Ea1Ch+Ob	СО	60	26	30	IA 0,6	29	9,82	2,31
			ДЧ		19	24		13	5,30	2,38
			ЯО		17	18		6	1,79	1,67
			Г		19	20		31	4,72	2,84
			БК		18	24		2	0,96	2,00

Примечание: А – возраст, $D_{1,3}$ – средний диаметр стволов на высоте 1,3 м, Н – средняя высота древостоя.

Виды деревьев: ДГ – дуб Гартвиса, Г – граб кавказский, КЛП – клен полевой, ДЧ – дуб черешчатый, ДК – дуб красный, ОС – осина, БК – бук восточный, ОЛЧ – ольха черная, СО – сосна обыкновенная, ЯО – ясень обыкновенный.

Note: A – age, $D_{1,3}$ – average trunk diameter at a height of 1,3 m, H – average stand height.

Tree species: Ho - Hartwiss's oak, Ch - Caucasian hornbeam, Fm – Field maple, O – common oak, No - Northern red oak, A – aspen, Ob - Oriental beech, Ba - Black alder, P – Scots pine, Ea - European ash.

Источник: собственные данные автора

Source: authors own data

Исследования В.И. Таранкова в дубравах Белгородской области выявили аналогичные закономерности с пиком продуктивности в возрасте 40-50 лет, что обуславливает необходимость проведения рубок ухода в средневозрастных насаждениях [17]. Полученные данные могут быть экстраполированы на условия Северного Кавказа с учетом региональных почвенно-климатических особенностей.

Особый интерес представляют работы, посвященные смешанным насаждениям. П.Н. Алентьевым установлено, что дубово-грабовые древостои с участием клена характеризуются повышенной устойчивостью к патогенам по сравнению с чистыми культурами дуба [18]. Эти выводы коррелируют с результатами исследований дубрав Центральной Европы, где смешанные насаждения демонстрируют большую засухоустойчивость.

Отдельного внимания заслуживает роль дубрав в углеродном балансе. Как показали исследования Д.Г. Замолодчикова и др., древостои дуба в возрасте 40-80 лет обладают значительным потенциалом депонирования углерода, что определяет их важность для реализации климатических программ [19,20].

Проведенные исследования выявили существенное влияние климатических изменений и антропогенного фактора на состояние дубрав предгорий Северного Кавказа, что согласуется с выводами Битюкова Н.А. [20] о необходимости внедрения адаптивных методов лесопользования в условиях наблюдаемого усыхания насаждений.

В ходе полевых исследований на территории Майкопского лесничества (Лесосеменное и Курджипское участковые лесничества) методами глазомерно-измерительной и перечислительной таксации установлены современные лесоводственно-таксационные характеристики искусственных насаждений. Расчет средневзвешенной категории санитарного состояния насаждений с учетом породного состава показал, что исследуемые древостои характеризуются как ослабленные, с варьированием показателя в диапазоне 1,57-2,37 балла.

Анализ возрастной динамики выявил значимое влияние породного состава на санитарное состояние насаждений. Наличие в составе быстрорастущих недолговечных пород (ольха черная, осина) способствует ухудшению состояния древостоев, с индексом санитарного состояния 2,17-4,0, что соответствует категориям от "ослабленных" до "усыхающих". При этом

основная лесообразующая порода - дуб - демонстрирует относительно стабильные показатели (индекс 1,85-1,91).

Структура древостоя по категориям санитарного состояния характеризуется следующим распределением:

- здоровые деревья (I категория): 40,7% от общего запаса
- ослабленные деревья (II категория): 40,0%
- сильно ослабленные деревья (III категория): 15,7%
- усыхающие и сухостойные деревья: 3,6%

Особую экологическую опасность представляет значительная доля сильно ослабленных деревьев, являющихся резерватом стволовых вредителей и грибковых заболеваний. Отмечается четкая возрастная тенденция к перераспределению долей деревьев различных категорий состояния с постепенным снижением процента здоровых экземпляров и увеличением доли ослабленных и сильно ослабленных деревьев.

Полученные данные коррелируют с результатами многолетних лесопатологических исследований, подтверждающими общую тенденцию к ухудшению санитарного состояния лесообразующих пород Северного Кавказа. Распределение запаса насаждений по категориям санитарного состояния детально представлено в таблице 3 (рисунок 1).

Выявленные закономерности underscore необходимость разработки дифференцированных лесохозяйственных мероприятий, учитывающих возрастную динамику и породную структуру насаждений для повышения устойчивости дубрав в условиях меняющегося климата.

Таблица 3

Table 3

Распределение запаса насаждений по категориям санитарного состояния

Distribution of stand stock by sanitary condition categories

Квартал | Quarter Выдел | Subcompartment Категория санитарного состояния | Sanitary condition category	28 19	28 18	28 1	5 14	40 9;53	40 18	40 17	40 20	40 26	40 28	40 38	40 41	39 49
без признаков ослабления | no signs of weakening	41,0	45,0	81,6	9,4	12,8	5,2	7,9	6,0	13,3	6,8	3,4	2,8	3,7
ослабленные | weakened	35,0	40,8	33,5	16,6	7,5	8,9	22,7	20,2	13,9	9,6	7,4	9,2	9,8
сильно ослабленные | severely weakened	8,2	10,3	14,7	7,6	6,5	5,2	9,2	9,2	3,7	3,7	3,1	4,9	6,0
усыхающие | dying	3,0	1,9	1,6	2,4	0,8	0,2	1,0	0,4	0,2	0,8	1,3	0,2	2,9
погибшие | dead	0,0	0,8	2,3	0,0	0,5	0,2	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,2

Источник: собственные данные автора

Source: authors own data

Данные таблицы 3 демонстрируют распределение запаса насаждений по категориям санитарного состояния. Анализ показывает преобладание здоровых деревьев без признаков ослабления как по запасу, так и по количеству стволов на постоянных пробных площадях.

Наибольшая доля здоровых деревьев зафиксирована в дубовых культурах (квартал 28, выделы 19, 18, 1), где показатель достигает 40,7% по запасу и 41% по числу деревьев (таблицы 1, 3). Данные насаждения характеризуются преобладанием дуба Гартвиса и дуба черешчатого в смешении с грабом кавказским и кленом полевым.

Существенно менее благоприятная ситуация наблюдается в смешанных дубово-грабовых культурах с участием бука восточного, ольхи черной и осины. Снижение доли здоровых деревьев в данных насаждениях объясняется наличием быстрорастущих пород (ольха черная, осина), которые к возрасту 58 лет в основном

представлены сильно ослабленными и усыхающими экземплярами. В составе этих культур здоровые деревья представлены преимущественно дубом черешчатым, грабом кавказским и буком восточным.

Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии породного состава на санитарное состояние средневозрастных насаждений и подтверждают необходимость учета биологических особенностей древесных пород при планировании лесовосстановительных мероприятий. По мимо оценки санитарного состояния дубовых насаждений проведена, качественная оценка всех деревьев на постоянных пробных площадях. Качественная оценка деревьев проводилась с распределением на деловые, полуделовые и дровяные. При оценке учитывался ряд параметров: порода, размер, состояние ствола, наличия дефектов. К деловым деревьям отнесены деревья, у которых диаметр ствола от 24 см и более (для хвойных – от 18 см). Качественные показатели - прямой, ровный ствол без сучков и искривлений с минимальным количеством пороков таких как трещины, гниль, грибковые поражения, а также отсутствие механических повреждений. Полуделовые деревья – диаметр от 16 до 24 см (для хвойных – от 14 до18 см). Качественные показатели - небольшие искривления или сучковатость с наличием незначительных дефектов (неглубокие трещины, небольшая косослойность). Дровяные деревья – диаметр менее 16 см (или любого размера, но с сильными дефектами).

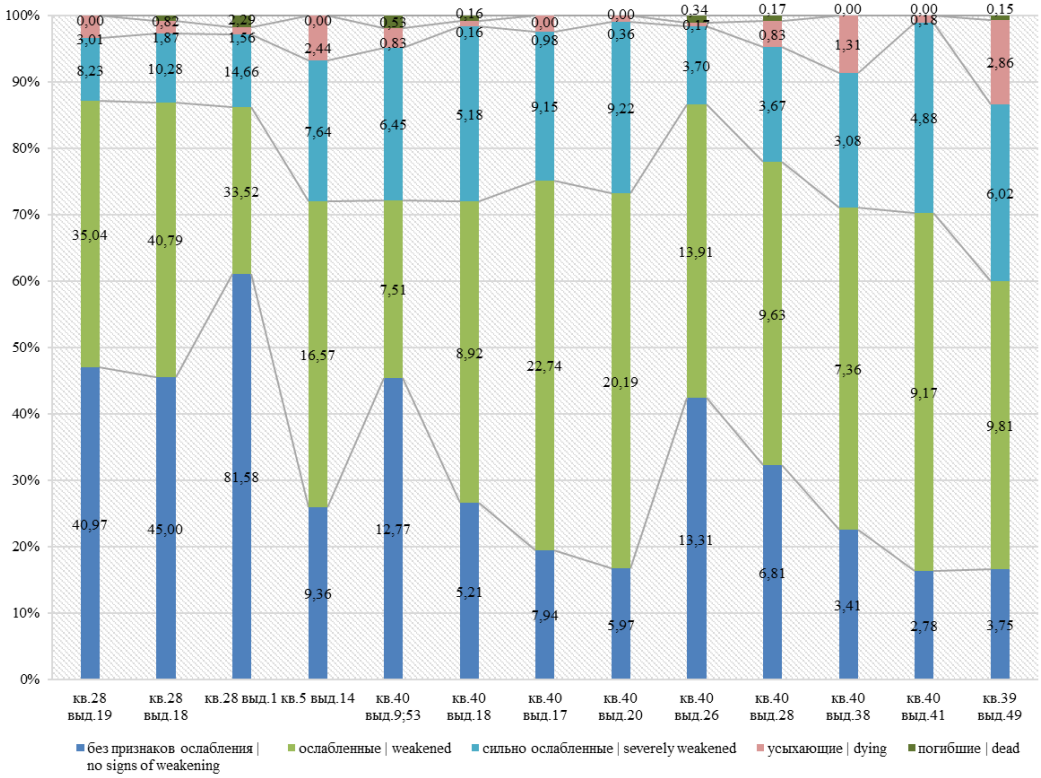


Рисунок 1. Распределение запаса древесных порода, по категориям санитарного состояния Лесосеменного и Курджипского участковых лесничеств

Figure 1. Distribution of timber stock by tree species across sanitary condition categories in Lesosemennoye and Kurdzhipskoye unit forestry districts

Качественные показатели - сильная кривизна, множественные сучки, гниль, трещины, повреждения вредителями или болезнями.

Товарная структура дубовых насаждений Майкопского лесничества приведена в таблице 4.

Таблица 4
Table 4

Товарная структура дубовых насаждений
Merchantable structure of oak stands

Кв. | Qtr.	Выд. | S.C.	Состав насаждений по породам | Stand composition by of the tree species	Категория деревьев | Tree category			Запас м³/га | Stock m³/ha
			Деловые | Merchantable	Полуделовые | Semi-Merchantable	Дровяные | Fuelwood	
28	19	ДГ	68	57	17	342,23
		Г	0	4	1	3,48
		КЛП	0	0	3	3,32
28	18	ДЧ	55	49	15	389,49
		Г	0	3	3	5,56
28	1	ДЧ	81	17	11	378,60
		Г	21	40	26	71,66
		КЛП	25	38	13	84,19
5	14	ДК	8	10	5	75,43
		ДЧ	6	6	2	26,12
		Г	0	4	1	3,50
		ОС	0	6	6	38,98
40	9; 53	ДЧ	22	7	10	83,09
		Г	7	20	14	24,72
		БК	0	2	1	4,62
40	18	ДЧ	15	12	9	30,04
		Г	8	20	21	31,28
		БК	3	12	1	17,22
40	17	СО	11	9	14	66,76
		ДЧ	2	10	0	22,60
		БК	3	8	0	13,85
		Г	1	17	5	60,05
40	20	ДЧ	10	22	10	91,12
		Г	3	43	23	49,86
		БК	0	2	0	1,98
40	26	ДЧ	15	8	0	54,17
		Г	7	21	25	35,62
		БК	7	12	0	35,90
40	28	ДЧ	9	7	0	37,78
		Г	3	15	17	23,49
		БК	2	6	2	19,88
		ОС	0	0	1	3,28
40	38	ДЧ	5	6	2	15,60
		Г	5	10	9	18,22
		БК	2	5	0	13,44
		ОЛЧ	0	2	2	10,08
		ОС	0	0	1	3,28

40	41	ДЧ	8	15	4	37,48
		Г	0	14	18	11,74
		ОЛЧ	0	4	3	8,52
		БК	0	5	1	7,04
		ОС	0	0	1	3,28
39	49	СО	6	13	10	39,27
		ДЧ	2	5	6	21,22
		ЯО	2	4	0	7,18
		Г	2	8	21	18,88
		БК	0	2	0	3,84

Примечание: ДГ – дуб Гартвиса, Г – граб кавказский, КЛП – клен полевой, ДЧ – дуб черешчатый, ДК – дуб красный, ОС – осина, БК – бук восточный, ОЛЧ – ольха черная, СО – сосна обыкновенная, ЯО – ясень обыкновенный.

Note: Ho - Hartwiss's oak, Ch - Caucasian hornbeam, Fm – Field maple, O – common oak, No - Northern red oak, A – aspen, Ob - Oriental beech, Ba - Black alder, P – Scots pine, Ea - European ash.

Источник: собственные данные автора

Source: authors own data

Продуктивность дубовых насаждений оценивалась по запасу древесины — основному показателю для определения объемов деловой древесины. Наибольший запас (395,05 м³/га) зарегистрирован в дубово-грабовых культурах (кв. 28, выд. 18), причем доля дуба черешчатого в нем составляет 389,49 м³/га.

Наименьший показатель — 60,62 м³/га — отмечен в смешанном насаждении (кв. 40, выд. 38). Основной запас здесь формируют дуб, граб и бук (47,26 м³/га), тогда как на долю ольхи и осины приходится 13,36 м³/га, причем минимальное значение (3,28 м³/га) — у осины.

В среднем, по данным пробных площадей, запас насаждений составляет около 85 м³/га (рисунок 2).

По результатам качественной оценки древостоя на постоянных пробных площадях установлено, что дуб черешчатый является преобладающей породой в категории деловых стволов с запасом до 81 м³/га. В категории полуделовых стволов доминируют граб кавказский (до 43 м³/га) и дуб черешчатый (до 22 м³/га). Основной объём дровяной древесины формируется за счёт граба кавказского (до 26 м³/га) и сосны обыкновенной (до 14 м³/га). Анализ распределения запаса по породам подтверждает доминирующее положение дуба черешчатого, который не только обладает наибольшим общим запасом (389,49 м³/га), но и лидирует по доле деловой древесины.

Граб кавказский является основной породой в полуделовой и дровяной категориях. Бук восточный, несмотря на значительный единичный запас (до 35,90 м³/га), представлен преимущественно полуделовой древесиной. Наименее распространёнными породами в насаждениях являются ольха чёрная и ясень обыкновенный с запасом, не превышающим 10 м³/га. Осина встречается исключительно в дровяной категории с запасом до 38,98 м³/га.

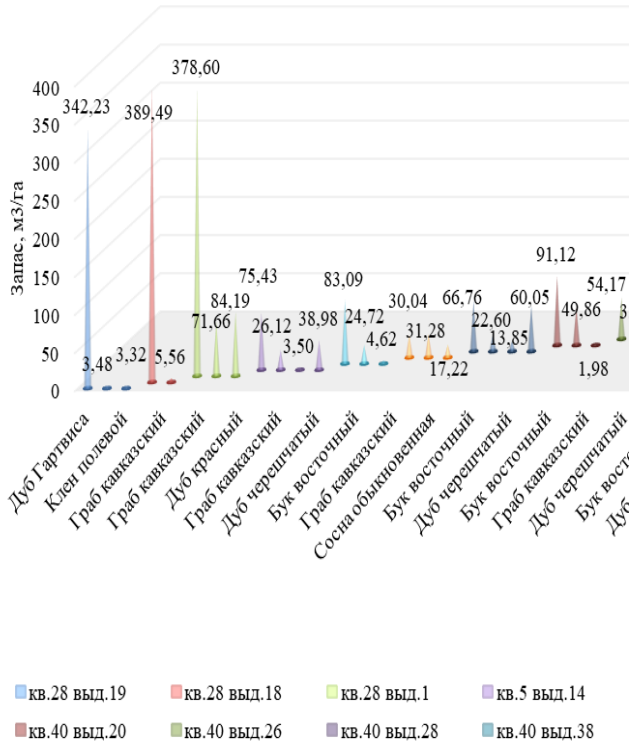


Рисунок 2. Распределение запаса дубовых насаждений Лесосеменного и Курджипского участковых лесничеств

Figure 2. Distribution of oak stand stock in Lesosemennoye and Kurdzhipskoye unit forestry districts

Анализ исследуемых насаждений позволяет идентифицировать дуб черешчатый в качестве основной лесохозяйственной породы для получения деловой древесины, особенно в квартале 28. Граб кавказский доминирует в структуре полуделовой и дровяной древесины, что свидетельствует о его низкой товарной ценности. Наличие высокой доли полуделовой и дровяной древесины у бука восточного и сосны обыкновенной указывает на необходимость проведения санитарно-оздоровительных мероприятий.

Наиболее продуктивные насаждения сосредоточены в квартале 28 (выделы 1, 18, 19), тогда как насаждения в кварталах 5 (выдел 14) и 39 (выдел 49) характеризуются как наименее перспективные для целевой заготовки.

Установлено, что возрастная динамика оказывает существенное влияние на продуктивность и санитарное состояние древостоев. Наибольшая товарная ценность наблюдается в насаждениях с преобладанием дуба черешчатого. С увеличением возраста древостоев отмечается ухудшение их санитарного состояния, которое выражается в сокращении доли здоровых деревьев и накоплении ослабленных, усыхающих и сухостойных экземпляров. Наиболее значительная деградация фиксируется в древостоях с участием быстрорастущих пород, таких как ольха черная и осина.

Для повышения продуктивности дубрав, оптимизации их товарной структуры и улучшения санитарного состояния целесообразно регулярное проведение комплекса лесохозяйственных мероприятий, включая рубки ухода и санитарные рубки. В рамках данных мероприятий приоритетному удалению подлежат сухостойные, усыхающие и сильно ослабленные деревья, что создаст благоприятные условия для формирования здорового и высокопродуктивного древостоя.

Проведенное исследование продуктивности и санитарного состояния дубрав предгорий Северного Кавказа (на примере Республики Адыгея) позволило сформулировать следующие выводы, имеющие научное и практическое значение для лесного хозяйства региона:

Высокая продуктивность дубрав подтверждается максимальным запасом древесины в дубово-грабовых насаждениях с преобладанием дуба черешчатого — до 389,49 м³/га. Средний запас насаждений составляет approximately 85 м³/га, что

определяет дуб черешчатый в качестве основной лесохозяйственной породы для получения деловой древесины.

1. Санитарное состояние насаждений характеризуется как ослабленное, о чем свидетельствуют значения индекса санитарного состояния в диапазоне от 1,57 до 2,37 балла. Существенный негативный вклад вносят быстрорастущие породы (ольха черная, осина), которые к возрасту 50–60 лет в значительной степени представлены сильно ослабленными и усыхающими деревьями.
2. Ключевыми факторами риска для устойчивости дубрав являются распространение патогенов (вредителей и грибных болезней) и последствия климатических изменений, что обусловливает необходимость организации системы регулярного лесопатологического мониторинга и проведения своевременных защитных мероприятий.

С учетом выявленных закономерностей для оптимизации ведения хозяйства в дубравах региона целесообразно:

1. Содействовать формированию смешанных древостоев на основе дуба черешчатого с примесью граба кавказского и бука восточного. Подобный состав способствует повышению общей устойчивости и биоразнообразия насаждений, что находит подтверждение в современных лесоводственных исследованиях.
2. В качестве первоочередной меры в ослабленных насаждениях рекомендуется проведение санитарных рубок, направленных на удаление источников инфекции и очагов массового размножения вредителей.
3. При проведении лесовосстановительных работ необходимо строго учитывать местные эдафо-климатические условия, что является залогом создания долговечных и высокопродуктивных дубрав.

Заключение

Проведенные комплексные исследования дубрав предгорий Северного Кавказа на территории Майкопского лесничества Республики Адыгея позволили получить репрезентативные данные о современном состоянии и продуктивности этих ценных лесных экосистем.

На основании детального анализа 13 постоянных пробных площадей установлено, что дубравы региона характеризуются средней и высокой продуктивностью. Максимальный запас древесины (395,05 м³/га) зафиксирован в дубово-грабовых насаждениях квартала 28, где доля дуба черешчатого достигает 389,49 м³/га. Средний запас насаждений составляет approximately 85 м³/га, что подтверждает высокий лесорастительный потенциал территории.

Качественная оценка древостоев выявила доминирующую роль дуба черешчатого в формировании деловой древесины (до 81 м³/га), тогда как граб кавказский преобладает в категориях полуделовой и дровяной древесины. Установлено, что товарная структура насаждений существенно зависит от породного состава - смешанные дубово-грабовые насаждения демонстрируют лучшие показатели по сравнению с чистыми культурами. Санитарное состояние исследованных дубрав оценивается как ослабленное, со значениями индекса санитарного состояния в диапазоне 1,57-2,37 балла. Выявлена четкая возрастная динамика ухудшения состояния древостоев, особенно выраженная в насаждениях с участием быстрорастущих пород (ольха черная, осина), которые к возрасту 50-60 лет преимущественно представлены сильно ослабленными и усыхающими деревьями.

На основании полученных результатов разработан комплекс лесохозяйственных рекомендаций, включающий:

- создание смешанных насаждений на основе дуба черешчатого с участием граба кавказского и бука восточного;
- проведение своевременных санитарных рубок в ослабленных насаждениях;
- учет местных почвенно-климатических условий при лесовосстановительных мероприятиях.

Реализация предложенных мер будет способствовать повышению продуктивности, устойчивости и санитарного состояния дубрав региона, обеспечивая их сохранение и рациональное использование в условиях меняющегося климата.

Список литературы

1. Крючков, С. Н. Эколого-биологические аспекты формирования дубрав на возвышенностях и равнинных ландшафтах Нижнего Поволжья / С. Н. Крючков, А. В. Солонкин, А. С. Соломенцева // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, № 2(52). – С. 198-208. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-198-208.
2. Ульданова, Р. А. Продуктивность дубовых насаждений прибрежных территорий реки Волги / Р. А. Ульданова, А. Т. Сабиров // Российский журнал прикладной экологии. – 2021. – № 3(27). – С. 11-22. – DOI: 10.24852/2411-7374.2021.3.11.22.
3. Стороженко, В. Г. Отбор климатипов дуба черешчатого для лесовосстановления в Теллермановском опытном лесничестве / В. Г. Стороженко, П. А. Чеботарев, В. В. Чеботарева // Лесоведение. – 2024. – № 6. – С. 640-648. – DOI: 10.31857/S0024114824060056.
4. Кулакова, Е. Н. Дубравы Северного Кавказа и их товарная структура / Е. Н. Кулакова, С. Н. Кружилин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 187. – С. 55-66. – DOI: 10.21515/1990-4665-187-010.
5. Пуряев, А. С. Дубравы Среднего Поволжья: состояние, воспроизводство и сохранение / А. С. Пуряев, И. Н. Зарипов, В. А. Петров // Лесохозяйственная информация. – 2019. – № 3. – С. 190-198. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.16.
6. Петров, В. А. Восстановление дубрав на основе естественного возобновления дуба в Среднем Поволжье / В. А. Петров, Ф. С. Ильин, Н. Ф. Кузнецова // Лесохозяйственная информация. – 2022. – № 1. – С. 35-49. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.02.
7. Калмыкова, Е. В. Оценка адаптивной способности представителей рода Quercus в условиях засушливого климата / Е. В. Калмыкова, П. А. Кузьмин, П. А. Крылов // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 12. – С. 40-45. – DOI: 10.28983/asj.y2023i12pp40-45.
8. Govedar, Z. Adaptive forest management: case study of sessile oak (Quercus petraea (Matt.) Leibl.) forests on ozren mountain of the Republic of Srpska / Z. Govedar, M. Medarević // Russian Forestry Journal. – 2020. – No. 3(375). – P. 93-105. – DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-93-105.
9. Глушко, С. Г. Реализация стратегии лесообразователей в ходе восстановительных сукцессий / С. Г. Глушко, И. Р. Галиуллин, Н. Б. Прохоренко // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 1. – С. 5-12. – DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-5-12.
10. Крючков, С. Н. Селекционная оценка и репродукция выделенного для лесоразведения генофонда дуба черешчатого в Нижнем Поволжье / С. Н. Крючков, А. В. Солонкин, А. С. Соломенцева, С. А. Егоров // Лесоведение. – 2025. – № 4. – С. 471-486. – DOI: 10.31857/S0024114825040066.
11. Ширнина, Л. В. Плодоношение и качество семенного материала на семейственных ЛСП дуба черешчатого в Тамбовской области / Л. В. Ширнина, С. А. Крюкова, А. Л. Мусиевский, Е. Е. Кулаков // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2022. – № 145. – С. 110-117. – DOI: 10.36305/0513-1634-2022-145-110-117.
12. ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки. – М., 1983. – 24 с.
13. Грошев, Б. И. Лесотаксационный справочник / Б. И. Грошев, С. Г. Синицын, П. И. Мороз. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 228 с.
14. Таблицы для учета лесосечного фонда основных лесообразующих пород Северного Кавказа. – Майкоп: РИПО «Адыгея», 2000. – 352 с.
15. Лосицкий, К. Б. Дуб. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 288 с.

16. Таранков, В. И. Продуктивность и санитарное состояние дубовых насаждений / В. И. Таранков, А. И. Горобец, В. Н. Сизых // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2008. – № 184. – С. 15-21.
17. Алентьев, П. Н. Восстановление дубовых лесов Северного Кавказа и повышение их продуктивности. – Майкоп: Адыг. отд. Краснод. книж. изд., 1976. – 226 с.
18. Карелин Д. В. Использование многолетних измерений дыхания почвы для расчетов нетто-баланса углерода в экосистемах Центрального Черноземья / Д. В. Карелин, А. Н. Золотухин, О. В. Рыжков [и др.] // Почвоведение. – 2024. – № 10. – С. 1374-1386. – DOI 10.31857/S0032180X24100073. – EDN JXIGVZ.
19. Kaganov, V. V. Climate Effect on Carbon, Phytomass, and Litter Stocks in Forest Stands in the South of European Russia / V. V. Kaganov, D. G. Zamolodchikov, A. S. Mostovaya // Contemporary Problems of Ecology. – 2023. – Vol. 16, No. 7. – P. 994-1006. – DOI 10.1134/s1995425523070053. – EDN MYZLDQ.
20. Битюков, Н. А. Геоэкологические исследования и принципы ведения хозяйства в горных лесах Северного Кавказа / Н. А. Битюков // Лесоведение. – 2023. – № 3. – С. 322-336. – DOI: 10.31857/S0024114823030026.

References

1. Kryuchkov S. N., Solonkin A. V., Solomentseva A. S. E'kologo-biologicheskie aspekty' formirovaniya dubrav na vozy'shhennostyax i ravninny'x landshaftax Nizhnego Povolzh'ya. [Ecological and biological aspects of oak forests formation on uplands and flat landscapes in Lower Volga region]. Ustojchivoe razvitie gorny'x territorij = Sustainable Development of Mountain Territories. 2022;14(2):198-208. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-198-208.
2. Ul'danova R. A., Sabirov A. T. Produktivnost' dubovy'x nasazhdenij pribrezhny'x territorij reki Volgi. [Productivity of oak stands in coastal areas of the Volga River]. Rossijskij zhurnal prikladnoj e'kologii = Russian Journal of Applied Ecology. 2021;3(27):11-22. (In Russ.). DOI: 10.24852/2411-7374.2021.3.11.22.
3. Storozhenko V. G., Chebotarev P. A., Chebotareva V. V. Otbor klimatipov duba chereshchatogo dlya lesovosstanovleniya v Tellermanovskom opytnom lesnichestve. [Selection of pedunculate oak climatypes for reforestation in Tellermanovsky experimental forestry]. Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science. 2024;6:640-648. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114824060056.
4. Kulakova E. N., Kruzhilin S. N. Dubravy' Severnogo Kavkaza i ix Tovarnaya struktura. [Oak forests of the North Caucasus and their commodity structure]. Politematicheskij setevoj e'lektronny'j nauchny'j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2023;187:55-66. (In Russ.). DOI: 10.21515/1990-4665-187-010.
5. Puryaev A. S., Zaripov I. N., Petrov V. A. Dubravy' Srednego Povolzh'ya: sostoyanie, vosproizvodstvo i soxranenie. [Oak forests of the Middle Volga region: condition, reproduction and conservation]. Lesoxozyajstvennaya informacziya = Forestry Information. 2019;3:190-198. (In Russ.). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.16.
6. Petrov V. A., Il'in F. S., Kuznecova N. F. Vosstanovlenie dubrav na osnove estestvennogo vozobnovleniya duba v Srednem Povolzh'e. [Restoration of oak forests based on natural regeneration of oak in the Middle Volga region]. Lesoxozyajstvennaya informacziya = Forestry Information. 2022;1:35-49. (In Russ.). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.02.
7. Kalmykova E. V., Kuz'min P. A., Kry'lov P. A. Ocenka adaptivnoj sposobnosti predstavitelej roda Quercus v usloviyax zasushlivogo klimata. [Assessment of adaptive capacity of Quercus genus representatives in arid climate conditions]. Agrarny'j nauchny'j zhurnal = Agricultural Science Journal. 2023;12:40-45. (In Russ.). DOI: 10.28983/asj.y2023i12pp40-45.

8. Govedar Z., Medarević M. Adaptive forest management: case study of sessile oak (Quercus petraea (Matt.) Leibl.) forests on ozren mountain of the Republic of Srpska. Russian Forestry Journal. 2020;3(375):93-105. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-93-105.
9. Glushko S. G., Galiullin I. R., Proxorenko N. B. Realizacziya strategii lesoobrazovatelej v xode vosstanovitel'ny'x sukczessij. [Implementation of forest former strategies during restoration successions]. Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2021;25(1):5-12. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-5-12.
10. Kryuchkov S. N., Solonkin A. V., Solomentseva A. S., Egorov S. A. Selekcionnaya ocenka i reprodukcziya vy'delennogo dlya lesorazvedeniya genofonda duba chereshchatogo v Nizhnem Povolzh'e. [Selection assessment and reproduction of allocated for afforestation gene pool of pedunculate oak in the Lower Volga region]. Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science. 2025;4:471-486. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114825040066.
11. Shirnina L. V., Kryukova S. A., Musievskij A. L., Kulakov E. E. Plodonoshenie i kachestvo semennogo materiala na semejstvenny'x LSP duba chereshchatogo v Tambovskoj oblasti. [Fruiting and quality of seed material on familial plus stands of pedunculate oak in Tambov region]. Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada = Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden. 2022;145:110-117. (In Russ.). DOI: 10.36305/0513-1634-2022-145-110-117.
12. OST 56-69-83. Probny'e ploshhadi lesoustroitel'ny'e. Metod zakladki. [Trial forest management areas. Laying method]. Moscow; 1983. 24 p. (In Russ.).
13. Groshev B. I., Siniczy'n S. G., Moroz P. I. Lesotaksaczionny'j spravochnik. [Forest taxation reference book]. Moscow: Lesn. prom-st'; 1980. 228 p. (In Russ.).
14. Tabel'czi dlya ucheta lesosechnogo fonda osnovny'x lesoobrazuyushhix porod Severnogo Kavkaza. [Tables for accounting of logging fund of main forest-forming species of the North Caucasus]. Majkop: RIPO «Ady'geya»; 2000. 352 p. (In Russ.).
15. Losiczkij K. B. Dub. [Oak]. Moscow: Lesnaya promy'shlennost'; 1981. 288 p. (In Russ.).
16. Tarankov V. I., Gorobecz A. I., Sizy'x V. N. Produktivnost' i sanitarnoe sostoyanie dubovy'x nasazhdenij. [Productivity and sanitary condition of oak stands]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii = News of the Saint Petersburg Forestry Engineering Academy. 2008;1 84:15-21. (In Russ.).
17. Alent'ev P. N. Vosstanovlenie dubovy'x lesov Severnogo Kavkaza i povy'shenie ix produktivnosti. [Restoration of oak forests of the North Caucasus and increasing their productivity]. Majkop: Ady'g. otd. Krasnod. knizh. izd.; 1976. 226 p. (In Russ.).
18. Karelin D. V., Zolotukhin A. N., Ryzhkov O. V. [et al.] Ispol'zovanie mnogoletnikh izmereniy dykhaniya pochvy dlya raschetov netto-balansa ugleroda v ekosistemakh Tsentral'nogo Chernozem'ya. [Use of long-term soil respiration measurements for net carbon balance calculations in Central Chernozem region ecosystems]. Pochvovedenie = Eurasian Soil Science. 2024;10:1374-1386. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0032180X24100073.
19. Kaganov, V. V., Zamolodchikov D. G., Mostovaya A.S. Climate Effect on Carbon, Phytomass, and Litter Stocks in Forest Stands in the South of European Russia. Contemporary Problems of Ecology. 2023; 16 (7):994-1006. – DOI 10.1134/s1995425523070053. – EDN MYZLDQ.
20. Bityukov N. A. Geoekologicheskie issledovaniya i principy' vedeniya xozyajstva v gorny'x lesax Severnogo Kavkaza. [Geoecological research and principles of management in mountain forests of the North Caucasus]. Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science. 2023; 3:322-336. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114823030026.

Сведения об авторе

✉ *Штепа Екатерина Николаевна* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; Researcher ID: AEV-3782-2022, ORCID: 0000-0002-0111-1883, РИНЦ: Author ID: 813759, e-mail: kulakova_92@list.ru.

Information about the author

✉ *Ekaterina N. Shtepa* – cand. sci. (agric.), associate professor of the department of forest crops, Departments of Landscape Architecture and Soil Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; Researcher ID: AEV-3782-2022, ORCID: 0000-0002-0111-1883, РИНЦ: Author ID: 813759, e-mail: kulakova_92@list.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/19
УДК 630*620.22:544.4:544.723:674.8

Композитный материал с высокой адсорбционно-каталитической активностью на основе биоугля из опилок березы повислой (*Betula Pendula*)

Алёна В. Дорошенко[1] ✉ al.doroschencko2016@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7487-5078
Мария В. Бережная[1], cnurova2010@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-3511-8645
Елена В. Томина[1,2], tomina-e-v@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-5222-0756

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация*
[2]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, Воронеж, 394018, Российская Федерация*

В настоящее время актуальной задачей является поиск новых способов очистки сточных вод на основе дешевых экологичных материалов. Композитные материалы на основе биоугольной матрицы с наноразмерными модификаторами позволяют решать задачи повышения эффективности адсорбции поллютантов и фотокаталитической очистки водных сред. Методом цитратного горения синтезированы наноразмерный феррит кобальта со структурой шпинели $CoFe_2O_4$ и композит на основе биоугля с наночастицами феррита кобальта $CoFe_2O_4$@C. Уголь для композита получен карбонизацией березовых опилок при температуре 600 ºС. Методом рентгеновской дифрактометрии подтверждено формирование наноразмерных кристаллитов шпинели $CoFe_2O_4$ во всех образцах. Средний размер наночастиц уменьшается от 31 ± 4 нм для чистого феррита кобальта до 17 ± 2 нм для композита на основе биоугля. Методом ИК-спектроскопии подтверждено формирование фазы кобальтовой шпинели и наличие большого количества поверхностных функциональных групп (–OH, –C=O, –C=C, $–CH_3$) в композите. Проведен анализ адсорбционно-каталитической активности $CoFe_2O_4$ и $CoFe_2O_4$@C в отношении очистки водных растворов от 2,4-динитрофенола (ДНФ). Установлена высокая эффективность очистки от ДНФ наноразмерным ферритом кобальта (99.95%) и композитом на основе биоугля (96.84%) за счет сорбции на пористых материалах и фотокаталитической деградации токсиканта в условиях УФ облучения. Результаты исследования подтверждают, что композиты на основе биоугля из отходов деревообрабатывающей промышленности являются перспективными сорбентами/катализаторами для очистки сточных вод бумажной, фармацевтической и текстильной промышленности от органических поллютантов. Благодаря магниточувствительности композита за счет наночастиц $CoFe_2O_4$ значительно упрощается выделение сорбента/катализатора внешним магнитным полем с целью последующей регенерации и повторного использования.

Ключевые слова: *пиролиз, биоуголь, феррит кобальта, композит, сорбция, фотокатализ*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00122, https://rscf.ru/project/23-23-00122/.
Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.
Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дорошенко А.В. Композитный материал с высокой адсорбционно-каталитической активностью на основе биоугля из опилок березы повислой (*Betula Pendula*) / А.В. Дорошенко, М.В. Бережная, Е.В. Томина // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 327-342. – *Библиогр.: с. 336-341 (40 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/19.

Поступила 25.07. 2025. ***Пересмотрена*** 17.11.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Composite material with high adsorption-catalytic activity based on biochar from sawdust of birch (*Betula Pendula*)

Alyona V. Doroshenko[1] ✉ al.doroschencko2016@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7487-5078

Maria V. Berezhnaya[1], cnurova2010@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-3511-8645

Elena V. Tomina[1,2], tomina-e-v@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-5222-0756

[1] *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

[2] *Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation*

Abstract

Currently, a pressing issue is the search for new methods of wastewater treatment based on cheap environmentally friendly materials. Composite materials based on a biocoal matrix with nanosized modifiers make it possible to solve problems of increasing the efficiency of pollutant adsorption and photocatalytic purification of aquatic environments. Nanosized cobalt ferrite with a $CoFe_2O_4$ spinel structure and a biocoal-based composite with cobalt ferrite nanoparticles $CoFe_2O_4$@C were synthesized by the citrate combustion method. Carbon for the composite was obtained by carbonization of birch sawdust at a temperature of 600 ºC. The formation of nanosized $CoFe_2O_4$ spinel crystallites in all samples was confirmed by X-ray diffractometry. The average size of nanoparticles decreases from 31 ± 4 nm for pure cobalt ferrite to 17 ± 2 nm for a biocoal-based composite. The formation of the cobalt spinel phase and the presence of a large number of surface functional groups (–OH, –C=O, –C=C, $–CH_3$) in the composite were confirmed by IR spectroscopy. The adsorption and catalytic activity of $CoFe_2O_4$ and $CoFe_2O_4$@C in relation to the purification of aqueous solutions from 2,4-dinitrophenol (DNP) was analyzed. High efficiency of DNP purification by nanosized cobalt ferrite (99.95%) and biochar-based composite (96.84%) was established due to sorption on porous materials and photocatalytic degradation of the toxicant under UV irradiation. The results of the study confirm that biochar-based composites from wood processing waste are promising sorbents/catalysts for the purification of wastewater from paper, pharmaceutical and textile industries from organic pollutants. Due to the magnetic sensitivity of the composite due to $CoFe_2O_4$ nanoparticles, the extraction of the sorbent/catalyst by an external magnetic field is significantly simplified for subsequent regeneration and reuse.

Keywords: *pyrolysis, biochar, cobalt ferrite, composite, sorption, photocatalysis*

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF № 23-23-00122, https://rscf.ru/project/23-23-00122/.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to reviewing the article.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Doroshenko A.V., Berezhnaya M.V., Tomina E.V. (2025). Composite material with high adsorption-catalytic activity based on biochar from sawdust of birch (*Betula Pendula)*. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 327–342 (in Russian). *DOI:* https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/19.

Received 25.07. 2025. ***Revised*** 17.11.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Глобальный дефицит воды усугубляется не только ограниченными запасами, но и ухудшением её качества из-за ненадлежащего управления ресурсами и загрязнения [1, 2]. Сточные воды текстильных, кожевенных, фармацевтических, целлюлозо-бумажных производств содержат комплекс опасных веществ – от синтетических красителей до токсичных металлов, что является серьезной экологической проблемой [3].

Нитрофенолы и их производные – устойчивые, токсичные и канцерогенные загрязнители водных экосистем, образующиеся в результате промышленных процессов. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) относит 2-нитрофенол, 4-нитрофенол и 2,4-динитрофенол к числу приоритетных опасных веществ [4, 5]. Соединение 2,4-DNP, используемое при производстве взрывчатых веществ, красителей и пестицидов, проявляет выраженную цитотоксичность и мутагенность. Нитробензольные соединения, широко применяемые в химической промышленности, также характеризуются низкой биоразлагаемостью и высокой токсичностью, представляя угрозу для экосистем и здоровья человека [6, 7].

Согласно [8] адсорбция и фотокаталитическое окисление являются основными эффективными методами очистки сточных вод.

Перспективными материалами для катализа считаются ферриты со структурой шпинели (MFe_2O_4), обеспечивающие степень очистки до 94% за счет окислительно-восстановительных переходов ионов Fe^{2+}/Fe^{3+} [9-11]. Интересен в этом плане феррит кобальта ($CoFe_2O_4$) – фотокатализатор с высокой магнитной анизотропией и коэрцитивной силой, химической стабильностью и шириной запрещенной зоны (~2 эВ). Его биметаллическая структура обеспечивает эффективный перенос электронов между ионами Co и Fe, повышая каталитическую активность и устойчивость к вымыванию металлов [12, 13].

Однако склонность наночастиц $CoFe_2O_4$ к агломерации снижает число активных центров [14-16]. Эффективным решением для повышения дисперсии и переноса электронов является нанесение магнитных ферритов на углеродную матрицу, обладающую развитой пористостью, кислородсодержащими группами и способностью стабилизировать магнитные наночастицы [17]. Такой гибридный материал сочетает преимущества обоих компонентов: высокую каталитическую активность ферритов, адсорбционные свойства углерода и удобное магнитное разделение, что обеспечивает синергетический эффект. Использование углеродной матрицы способно снизить стоимость конечного продукта (сюда можно вставить).

Авторы [18] продемонстрировали высокую эффективность металл-угольных катализаторов в процессах очистки от смол и тяжелых металлов. Исследователи [19] выявили, что железосодержащие биоугольные катализаторы демонстрируют более высокую каталитическую активность в процессе разложения толуола по сравнению с традиционными катализаторами на основе оливина и никеля.

Пиролизный уголь обладает широким спектром функциональных свойств, включая развитую удельную поверхность, высокую пористость, наличие поверхностных функциональных групп (карбонильные, гидроксильные и карбоксильные группы образуют химические связи с органическими загрязнителями, включая водородные связи и π–π-взаимодействия), а также способность к электростатическим и ионообменным взаимодействиям. Благодаря физической и химической адсорбции БУ способен удерживать молекулы загрязнителей без

разрушения собственной структуры, демонстрируя высокую стабильность [20]. Его производство характеризуется относительно низкими затратами, что делает биоуголь наиболее подходящим носителем для высокодисперсных катализаторов на основе наночастиц [21]. Важным преимуществом биоугля является его способность прочно связывать ионы металлов и стабилизировать наночастицы, что существенно расширяет возможности его практического использования [22]. Кроме того, ароматические структуры биоугля способны взаимодействовать с токсичными соединениями за счет донорно-акцепторных механизмов, что повышает эффективность очистки [23-25]. Перспективным прекурсором для получения биоуглей являются древесные отходы (опилки, стружки, щепа). Доля таких отходов в РФ достаточно велика, тогда как процент их вторичного использования весьма незначителен. Проблемой использования биоугля является его затрудненное отделение от реакционной среды в силу высокой дисперсности и легкости, что усложняет его регенерацию. В этом плане представляются перспективными композиты биоугля с магнитными наноразмерными материалами, что позволит использовать для отделения сорбента/катализатора методы магнитной сепарации.

Ченг-Ди Донг и др. [26] продемонстрировали превосходство магнитного композита Fe_3O_4/RHB (на основе биоугля из рисовой шелухи) над чистым магнетитом в удалении эфиров фталевой кислоты из морских донных отложений. Повышенная эффективность объясняется синергетическим эффектом между наночастицами Fe_3O_4 и пористой углеродной матрицей, а также наличием кислородсодержащих функциональных групп на поверхности композита.

Авторы [27] отметили, что сочетание биоугля с наночастицами TiO_2 усилило фотокаталитическую деградацию сульфаметоксазола (СМЗ) за счёт увеличения адсорбции загрязняющих веществ на поверхности композита, уменьшения рекомбинации электрон-дырочных пар (e^-/h^+), расширения диапазона поглощения в видимом свете благодаря свободным электронам в структуре биоугля. В исследовании Кима и соавторов [28] было показано, что композит TiO_2/биоуголь превосходит коммерческий TiO_2 по адсорбционной способности и скорости фотокаталитической деградации СМЗ под УФ-излучением благодаря гидрофобным взаимодействиям между поверхностью биоугля и молекулами СМЗ. В исследовании [29] было установлено, что модификация диоксида титана биоуглем, полученным из биомассы, существенно повышает его фотокаталитическую активность в процессах очистки воды. Композитный материал демонстрирует сужение запрещённой зоны TiO_2 с 3.40 до 2.44 эВ, биоуголь предотвращает агломерацию наночастиц TiO_2, уменьшается их размер с 40.6 до 22.8 нм. Помимо этого, биоуголь действует как акцептор электронов, подавляя рекомбинацию зарядов и повышая эффективность фотокатализа. Уменьшение ширины запрещенной зоны для композита биоугля с наночастицами TiO_2 также отмечают Ядун Ду с коллегами [30]. Таким образом, применение композитных материалов на основе биоугля и фотокатализаторов не только повышает эффективность очистки воды, но и способствует созданию устойчивых и экономически доступных технологий водоочистки.

Анализ современных исследований показывает, что композиты на основе биоугля и неорганических нанокатализаторов эффективно усиливают процессы адсорбции и фотокаталитической деградации органических загрязнителей за счёт синергетического взаимодействия между пористой углеродной матрицей и активной нанофазой. Однако большинство работ [26–30] сосредоточено на фотокатализе (TiO_2/биоуголь, Fe_3O_4/биоуголь) и деградации антибиотиков или фталатов, тогда как системы, основанные на феррите кобальта, и особенно их применение в реакциях Фентона для удаления нитрофенолов, изучены крайне ограниченно. Остаются неясными механизмы распределения ролей между адсорбентом и каталитически активной фазой, вклад каждого компонента в суммарную очистку, а также кинетика деградации таких устойчивых соединений, как 2,4-динитрофенол.

Научная новизна работы заключается в установлениикинетики и механизма адсорбции и каталитической деградации 2,4-динитрофенола на предлагаемом композите $CoFe_2O_4$@C и выявлении вклада каждого из компонентов композита в суммарную эффективность очистки от токсиканта.

Целью данной работы является исследование адсорбционно-каталитической активности композита феррита кобальта с биоуглем в процессе удаления 2,4-динитрофенола из водной среды и установление синергетического эффекта совместного действия матрицы-адсорбента и наноразмерного фотокатализатора.

Материалы и методы

Полученный из опилок березы повислой (*Betula Pendula*) размером менее 1 мм, биоуголь был подвергнут карбонизации. Процесс проводили в герметичном реакторе при температуре 600 °C в течение 3 часов со скоростью нагрева 10 °C/мин. Размер частиц биоугля определяли методом механического просеивания на ситах согласно методике [31]. Для анализа распределения частиц по размерам использовались сита со стандартными ячейками 200 и 315 мкм. Массовые доли полученных фракций угля (>315 мкм, 200-315 мкм и <200 мкм) составили 28,8 %, 30,2 % и 41,0 % соответственно. Для синтеза использовалась фракция 200-315 мкм.

Активацию биоугля проводили путем обработки 2 М раствором КОН при 21 ºС в течение 2 часов при постоянном перемешивании. Массовое соотношение биоуголь – КОН составляло 1:4. На начальном этапе (первые 30 минут) суспензию подвергали ультразвуковому воздействию, что способствовало более равномерному распределению реагента и интенсификации диффузионных процессов. Ультразвуковую обработку проводили с использованием диспергатора ВУ-09-«Я-ФП»-0 с номинальной мощностью 110 Вт на частоте 22 кГц. Объем обрабатываемой реакционной смеси составлял 100 мл. Удельная энергия воздействия составляла примерно 1.1 Вт/мл. Затем БУ высушивали при температуре 110 ºС в сушильном шкафу (Смоленское СКТБ СПУ ШС-80-01 СПУ).

Определение насыпной плотности [32] осуществляли методом свободного заполнения мерного цилиндра с последующим взвешиванием. Массовую долю влаги [33] в пробе биоугля определяли по потере массы навески при высушивании (105 ºС) до постоянной массы. Значение pH водной вытяжки (ГОСТ 33578-2015) устанавливали после кипячения угольной суспензии в дистиллированной воде и её последующего охлаждения до комнатной температуры.

Синтез шпинели CFи композита CF@C (в соотношении феррит : биоуголь как 1:4) осуществляли методом цитратного горения (рис.1). Для проведения эксперимента были взяты кристаллогидраты $Fe(NO_3)_3*9H_2O$ (ЧДА) и $Co(NO_3)_2*6H_2O$ (ЧДА) в стехиометрическом соотношении. Далее их растворили в 100 мл дистиллированной воды. Затем к раствору добавляли (реакция 1) 28% водный раствор аммиака (ХЧ). Полученную смесь гидроксидов $Fe(OH)_3$ и $Co(OH)_2$ нагревали на магнитной мешалке до температуры ~250ºС. На стадии нагревания добавляли 1 М раствор лимонной кислоты, при этом происходило образование цитратных комплексов железа и кобальта. Для синтеза композитов на этом этапе вводили уголь с размером частиц 200-315 мкм. В ходе дальнейшего нагревания происходило вспучивание смеси ("цитратное горение") с образованием рыхлого порошка $CoFe_2O_4$ на поверхности угольной матрицы.

Полученные феррит CF и композит CF@C черного цвета подвергли промывке дистиллированной водой, фильтрации, сушке на воздухе. Затем образцы прокаливали в муфельной печи (SNOL 8.2/1100, AB "Umega", Литва) при 600 °C в течение 1 часа.

$$2Fe(NO_3)_3 + Co(NO_3)_2 + 8NH_4OH \rightarrow 2Fe(OH)_3\downarrow + Co(OH)_2\downarrow + 8NH_4NO_3 \quad (1)$$

Определение фазового состава синтезированных образцов осуществляли методом рентгенофазового анализа (дифрактометр Empyrean B.V. с анодом Cu (λ = 1.54060 нм)).

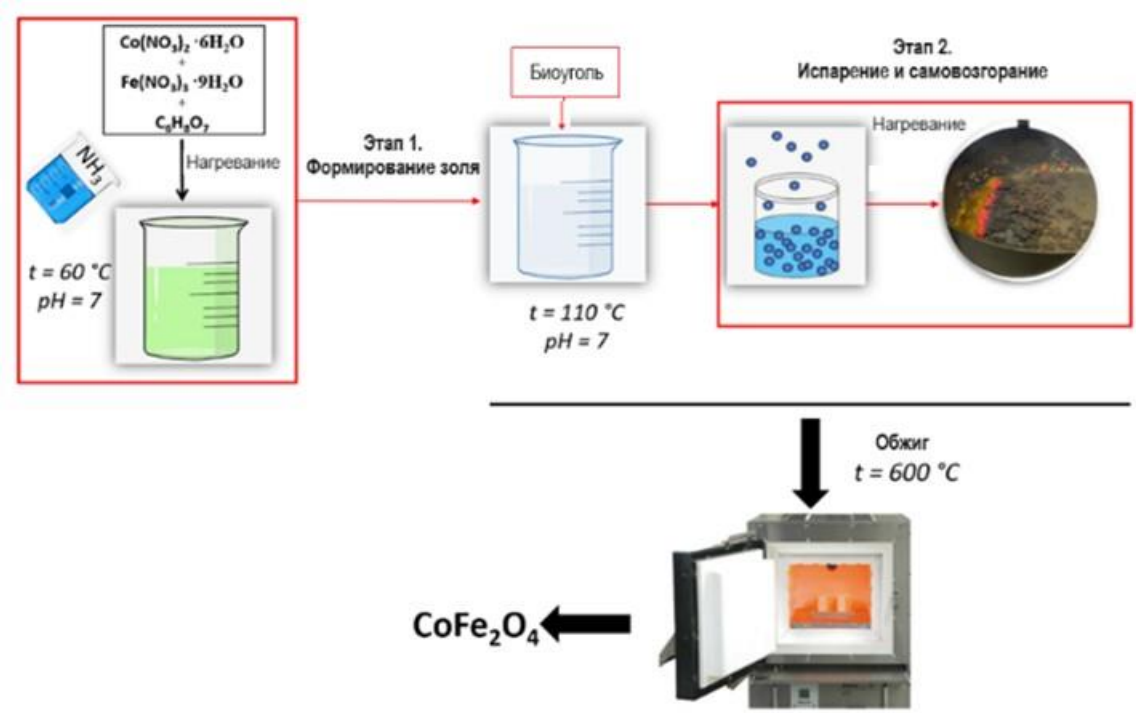


Рисунок 1. Общая схема синтеза образцов феррита-шпинели CF и композита CF@C

Figure 1. General scheme of synthesis of ferrite-spinel CF and CF@C composite samples

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Идентификация фаз проводилась с использованием базы данных JCPDS PCPDFWIN (International Centre for Diffraction Data, 1997).

Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) определялся по уширению линий рентгеновской дифракции согласно формуле Дебая-Шеррера [34]:

$$D = K\lambda / (\beta\cos\theta), \quad (4)$$

где K — постоянная Шеррера (близка к 0.9 для сферических частиц), β — ширина пика на половине высоты в радианах.

Исследуемые образцы CF и CF@C были охарактеризованы с помощью ИК-Фурье спектрометрии. Спектры снимались на приборе Vertex-70 (Bruker) с алмазной приставкой Platinum ATR, обеспечивающей измерение в режиме нарушенного полного внутреннего отражения в диапазоне 4000-100 $см^{-1}$. Обработка данных проводилась в программе Opus 8.0. Фотокаталитическую активность полученных материалов CF и CF@C оценили в процессе окисления 2,4-динитрофенола пероксидом водорода под ультрафиолетовым облучением (λ=270 нм, источник – УФ-лампа Nuobi UVC-E27, 40W) при перемешивании магнитной мешалкой (600 об/мин). Расстояние от лампы до реакционной смеси составляло 10 см. Концентрацию красителя определяли с помощью фотоколориметра «КФК-3-01 “ЗОМ3”». Измерения проводились в кварцевых кюветах с оптической длиной пути 20 мм. Для 2,4-динитрофенола (ДНФ) использовалась аналитическая длина волны 364 нм. Для поддержания pH на уровне 4.4 применялся ацетатный буфер. К 10 мл реакционного раствора (150 мг/л) добавляли 0.25 г CF или CF@C и выдерживали в темной камере (30x20 см, из нержавеющей стали) в течение 60 минут для достижения адсорбционного равновесия. После этого концентрации ДНФ составили 90 мг/л для CF и 20 мг/л для CF@C. Для оценки фотокаталитических свойств CF и CF@C к растворам добавляли 5 мл 10%-ного раствора

пероксида водорода (ОСЧ, CAS номер: 7722-84-1, «ISOLAB»), что соответствовало его концентрации 75 ммоль/л. Концентрация ДНФ измерялась через заданные промежутки времени.

Равновесная сорбционная емкость образцов рассчитывалась по формуле:

$$A = \frac{(C_н - C_р) * V}{m}, \quad (5)$$

где A – количество адсорбированного красителя, мг/г, $C_н$ – начальная концентрация раствора, мг/л, $C_р$ – равновесная концентрация раствора, мг/л, V – объем раствора, л, m – масса образца, г.

Степень очистки R раствора от ДНФ рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{(C_0 - C)}{C_0} * 100\%, \quad (6)$$

где C_0 - начальная концентрация красителя в растворе, мг/л; C - концентрация красителя в растворе в определенный момент времени, мг/л.

Результаты и обсуждение

Биоуголь, используемый в качестве матрицы для формирования композитного материала, при влажности 4.3 % и насыпной плотности 141.5 г/л имел значение pH 7.1.Такое значение характерно для материала, прошедшего карбонизацию при 600°C, и свидетельствует об отсутствии значительного количества кислых кислородсодержащих функциональных групп, которые могли бы подкислять среду.

Анализ дифрактограмм чистого феррита кобальта и композита CF@C выявил пики, соответствующие плоскостям (220), (311), (400), (422), (440), (511) и (620). Это подтверждает формирование однофазной кубической шпинели $CoFe_2O_4$ (JCPDS № 79-1744) в составе композита. Наличие высокого фона и уширенных рефлексов на дифрактограмме CF@C указывает на рентгеноаморфное состояние биоугля (рис. 2).

Средний размер ОКР наночастиц феррита кобальта, рассчитанный с использованием формулы Дебая – Шеррера, составляет 31± 4 нм для CF и 17 ± 2 нм для композита CF@C, что подтверждает данные [30] оменьшем размере наночастиц при их синтезе на поверхности матрицы и объясняется барьерным эффектом матрицы, препятствующим коалесценции и дальнейшему росту наночастиц.

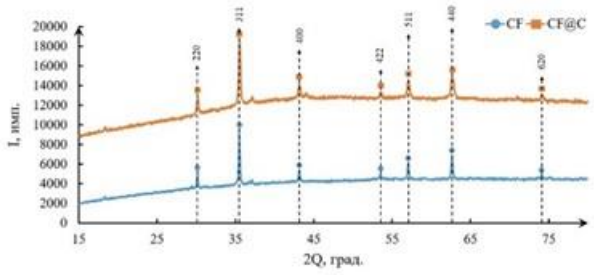


Рисунок 2. Результаты рентгенофазового анализа образцов CF и CF@C

Figure 2. Results of X-ray phase analysis of CF and CF@C samples

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

На ИК-спектре поглощения феррита кобальта (рис. 3) присутствует минимум пропускания в области 535-540 $см^{-1}$, который согласно Уолдрону [35] соответствует валентному колебанию катион-анионной связи M_A–O в тетраэдрических позициях. Полоса в районе 395-400 $см^{-1}$ соответствует валентному колебанию катион-анионной связи M_B – O в октаэдрических позиция [36].

На ИК-спектре CF@C (рис. 3) слабо выражен характерный для $CoFe_2O_4$ минимум пропускания связи M_A–O в районе 550 – 560 $см^{-1}$, полоса, соответствующая связи M_B –O, не идентифицируется. Вероятной причиной этого является сильный экранирующий эффект углеродной матрицы, приводящий к поглощению ИК-излучения в данной области, а также малый размер частиц, приводящий к размыванию характеристичных полос. В спектре наблюдаются полосы поглощения в диапазоне 1550-1710 $см^{-1}$, соответствующие колебаниям двойных связей углерод-углерод (C=C). В районе 1600 $см^{-1}$ эти колебания C=C накладываются на сигналы от хиноидных группировок C=C. Широкая область пониженного пропускания (минимум) между 1000 и 1500 $см^{-1}$, вероятно, является результатом суммирования нескольких сигналов: полос в диапазоне 1450-1500 $см^{-1}$, связанных с валентными

колебаниями связей С–ОН, и полос в диапазоне 1000-1250 $см^{-1}$, относящихся к колебаниям связей С–О в эфирных и карбоксильных группах. Минимум пропускания около 800 $см^{-1}$ указывает на присутствие арильных фрагментов и деформационных колебаний С-Н связей [37-39].

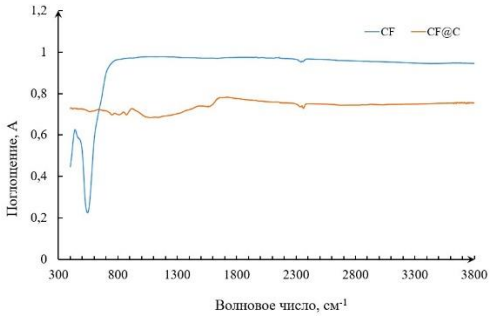


Рисунок 3. ИК-спектры шпинели CFикомпозитаCF@C

Figure 3. IR-spectra of CF spinel and CF@C composite

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Таким образом, методом ИК-спектроскопии подтвержден полифункциональный характер поверхности композита и присутствие на поверхности наночастиц $CoFe_2O_4$.

Определение адсорбционно-каталитической активности шпинели CF и композитаCF@C в отношении окисления ДНФ пероксидом водорода показало, что степень очистки раствора с начальной концентрацией ДНФ 150 мг/л после выдержки в темноте в течение часа за счет сорбции на чистом феррите и композите составляет 3.99% и 81.72% соответственно. Эти данные подтверждают низкие адсорбционные свойства наноразмерных ферритов-шпинелей относительно органических токсикантов, содержащих ароматические кольца, что, видимо, связано с одноименными зарядами поверхности ферритов и сорбируемой молекулы ДНФ [40]. Для 2,4-динитрофенола адсорбция может осложняться образованием внутримолекулярной водородной связи между водородом гидроксильной группы и ближайшим кислородом нитрогруппы в орто-положении, что сопровождается значительным увеличением отрицательного заряда на кислороде другой нитрогруппы.

Причиной высокой сорбционной способности композита CF@C по отношению к ДНФ является обилие разнообразных функциональных групп на его поверхности, которые взаимодействуют с токсикантом с образованием, прежде всего, водородных связей. Не исключается возможность реализации π–π-взаимодействий, вклад в адсорбцию вносит и электростатическое взаимодействие между адсорбентом и молекулами ДНФ.

Сорбционная емкость, рассчитанная по формуле 5, составила 4,04 мг/г и 4,80 мг/г для CF и CF@C соответственно. Таким образом, композитный материал обладает сорбционной способностью, в 1,2 раза превышающей аналогичный показатель для чистого феррита. Однако фотокаталитическая активность наноразмерного CoFe2O4 в процессе окислительной деградации ДНФ выше (степень деградации–99.95%), чем у CoFe2O4@C (степень деградации–84.71%). Ухудшение фотокаталитической активности композита можно объяснить комплексом факторов: во-первых, углеродная матрица экранирует УФ-излучение, уменьшая долю излучения, достигающего активных центров феррита кобальта. Во-вторых, углерод провоцирует рекомбинацию фотообразованных носителей заряда. Наконец, конкурирующая адсорбция органических молекул на матрице ограничивает взаимодействие пероксида водорода с активными центрами феррита.

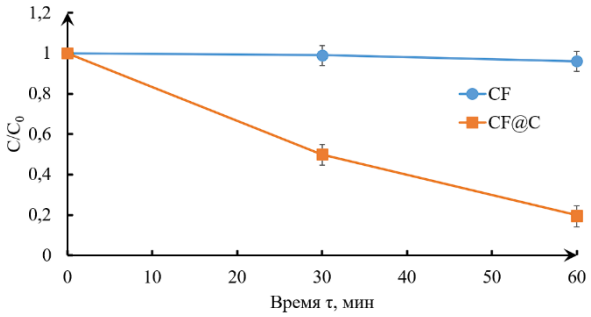


Рисунок 4. Сорбция 2,4-динитрофенола образцами шпинели CF и композитаCF@C600.

Figure 4. Sorption of 2,4-dinitrophenol by CF spinel and CF@C600 composite samples.

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

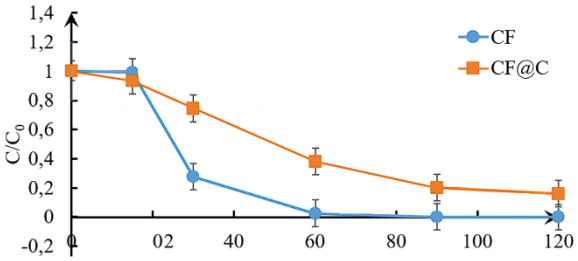


Рисунок 5. Кинетические кривые окисления ДНФ пероксидом водорода в присутствии CF и композита CF@Св координатах C/C_0 – t

Figure 5. Kinetic curves of DNP oxidation by hydrogen peroxide in the presence of CF and CF@C composite in coordinates C/C_0 – t coordinates

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Удаление ДНФ из воды достигается комбинированным методом: сорбцией на пористых материалах и фотокаталитической деградацией под действием УФ-излучения. Эффективность очистки составила 99.95% для CF и 96.84% для CF@C. Все данные прошли статистическую обработку. Нормальность распределения проверялась критерием Колмогорова, а статистическая значимость различий – тестом Стьюдента. Доверительная вероятность α была установлена на уровне 0.95, согласно ГОСТ Р 50779.22-2005.

При несколько меньшей степени очистки композит обладает существенным преимуществом – его магнитная управляемость позволяет легко отделять материал после процесса очистки без использования ультрацентрифугирования. Таким образом, CF@C сочетает высокую эффективность и удобство в обращении, что делает его более перспективным для практического применения. Переход от нанокристаллического феррита кобальта к композиту, где органической матрицей выступает биоуголь, приготовленный из древесных отходов, а модификатором- наноразмерный феррит кобальта позволяет за счет синергизма сорбции и фотодеградации поллютанта достигать высокой степени очистки при возможном удешевлении самого сорбента/катализатора.

Магниточувствительность композита, определяемая наночастицами $CoFe_2O_4$, значительно облегчает его выделение из водной среды за счет внешнего магнитного поля (рис. 6).



Рисунок 6. Магнитная сепарация CF@C из водной дисперсии при действии Nd-магнита

Figure 6. Magnetic separation of CF@C from aqueous dispersion under the action of a Nd magnet

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Помимо вышеперечисленного синтез предлагаемого полифункционального композитного материала решает проблему переработки древесных отходов, из которых на данный момент только половина подвергается вторичнойпереработке.

Заключение

Установлена сопоставимая эффективность очистки водных растворов от 2.4-динитрофенолананоразмерным ферритом кобальта CF (99.95%) и композитом на основе биоугля CF@C (96.84%). Однако композитный материал обладает ключевыми практическими преимуществами: решает экологическую проблему вторичной переработки древесных отходов; предположительно позволяет снизить себестоимость материала в сравнении с чистым наноразмерным ферритом, что

требует проведения отдельного технико-экономического обоснования; позволяет легко извлекать сорбент/катализатор методом магнитной сепарации, предотвращая вторичное загрязнение. Эти факторы делают CF@C более перспективным для промышленного применения, несмотря на незначительное снижение степени очистки от ДНФ по сравнению с чистым нанокристаллическим ферритом. Кроме того, переход от CF к CF@C представляет собой целенаправленный компромисс, в рамках которого небольшое снижение общей эффективности системы считается допустимым ради существенного улучшения ключевых эксплуатационных параметров (сорбция, управляемость).

Для подтверждения промышленной применимости материала CF@C требуются испытания на реальных сточных водах, а также оценка его ресурсоэффективности, включая способность к регенерации и многократному использованию.

Список литературы

1. Fito J., Van Hulle S.W.H. Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. Environment, Development and Sustainability. 2021; 23: 2949–2972. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-020-00732-y.
2. Du Plessis A. Persistent degradation: global water quality challenges and required actions. One Earth. 2022; 5: 129–131. DOI: https://doi.org/10.1016/j. oneear.2022.01.005.
3. Rong W., Zhipeng T., Chenyang Z., Wei S., Zhuo C., Xin W., Mengqi L. Research progress on heavy metal wastewater treatment in the integrated circuit industry: From pollution control to resource utilization. Separation and Purification Technology. 2025; 376(2): 134033. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134033.
4. Ruzgar A., Karatas Y., Yurderi M., Sener L., Gulcan M., ZahmakiranM.Synthesis, characterization, and determination of the catalytic roles of tungsten (VI) oxide-supported Pd (0) nanoparticles in the reduction of nitroaromatic pollutants. Materials Chemistry and Physics. 2025; 346: 131368. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131368.
5. Gautam N., Deka D., Das G. Efficient adsorption of nitroaromatic compounds from reusable hierarchical porous biochar emanates from the Ananas comosus crown and Citrus limetta fibers. Chemical Engineering Science. 2025; 308: 121408. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121408.
6. Sangamithirai D., Gopi Krishna K.R., Pandurangan A. Investigating the synergistic effect of RuO_2 nanoparticle-decorated V_2O_5 nanoflakes for sensitive detection of 2,4-dinitrophenol and 2,4-dinitrotoluene. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2024; 970: 118554. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118554.
7. Meira A.C.R., Mezalira D.Z., Tondo D.W., Bail A., Arizaga G.G.C., Domingos J.B., Giona R.M. Efficient and versatile catalyst for nitrobenzene compounds reduction based on magnetite coated with semi-metallic bismuth. Applied Surface Science. 2025; 684: 161866. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161866.
8. Fito J., Kefeni K.K., Nkambule T.I. The potential of biocah-photocatalytic nanocomposites for removal of organic micropollutions from wastewater. Science of The Total Environment. 2022; 829: 154648. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154648.
9. Soifi A., Hajjaoui H., Elmoubarki R., Abdennouri M. Spinel ferrites nanoparticles: Synthesis methods and application in heterogeneous Fenton oxidation of organic pollutants. Applied Surface Science Advances. 2021; 6: 100145.DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100145.
10. Томина Е.В., Ходосова Н.А., Синельников А.А., Жабин А.В., Куркин Н.А., Новикова Л.А. Влияние метода формирования композита наноразмерный $CoFe_2O_4$/нонтронит на его структуру и свойства. Конденсированные среды и межфазные границы. 2022; 24(3): 379–386. DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/9861.
11. Jarariya R., Suresh K. Spinel ferrite nanomaterials - $MgFe_2O_4$ - Synthesis by appropriate microwave solution combustion (Msc) method of visible light–responsive photocatalyst for Rb21 dye degradation. Materials Today: Proceedings. 2022; 34: 104576. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.393.

12. Gerbaldo M.V., Peralta M.F., Marchetti S.G., Mendoza S.M., Elias V.R., Crivello M.E., Mendieta S.N. Innovative spinel ferrites for efficient photocatalytic mineralization of carbamazepine in wastewater. Applied Surface Science. 2025; 698: 163132. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163132.
13. Sharma A., Basant Lal B., Somvanshi A., Suman, Alsayari A., Wahab Sh., Lakshmaiya N., Ravi K., Jasrotia R.Advanced functional spinel ferrite based nanomaterials for targeted wastewater treatment. Journal of Molecular Structure. 2025; 1351(2): 144284. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.144284.
14. Tomina E.V., Doroshenko A.V., Novikova L.A., Tyupina E.A., Kamzin A.S., Zhuzhukin K.V., Kopylov A.V. Synthesis, characterization, catalytic activity and adsorption properties of new nanosized cobalt-magnesium spinel ferrites for water treatment processes. Molecular Catalysis. 2025; 582: 115178. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mcat.2025.115178.
15. Xia L., Li X., Wei Z., Liu A., Chen J., Shang J. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. Chemical Engineering Journal. 2025; 525: 170068. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068.
16. Elaadssi Y., Madigou V., Arab M. Cobalt ferrites $Co_xFe_{3-x}O_4$ ($x = 1$ and $x = 1.5$) as photocatalysts under simulated sunlight: An experimental study coupled to predictive RSM approach. Surfaces and Interfaces. 2025; 68: 106655. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106655.
17. Hamad H.A., Adel M., Emara M.M., Elsenety M., Mohamed I., Bedir A.G., Gargar Z., Abouelela M.M., Eldeeb N.A., Ibrahim I., Hassan A.A., Abboubi M.E., Amin K.M. Ferrites/carbon allotropes nanocomposites for photocatalytic applications: A review. Coordination Chemistry Reviewsl. 2025; 534: 216537. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216537.
18. Mao X., Liu Y., Long Sh. Research progress on adsorption mechanisms and regeneration applications of modified biochar for heavy metals in wastewater. Desalination and Water Treatment. 2025; 324: 101399. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101399.
19. Jiang Y., Gao L., Dai J., Xie D.,Li C., Xiong H., Zhang J., Xu Q., Wang J., Tan Y. Enhanced thermal stability and moisture toleration for toluene catalytic decomposition over $MnCoO_x$ supported hierarchical porous biochars with CeO_2 encapsulation. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025; 13 (2): 115493. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115493.
20. Lu X., Xinlan L., Zhuojun W., Ang L., Jianqiu C., Jingge S. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. Chemical Engineering Journal. 2025; 525: 170068. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068.
21. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguyen L.H. Development of biochar supported $NiFe_2O_4$ composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively removemoxifloxacin from wastewater. Chemical Engineering Journal Advances. 2023; 16: 1005050. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100550.
22. Dong X., Chu Y., Tong Z., Sun M., Meng D., Yi X., Gao T., Wang M., Duan J. Mechanisms od adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024; 272: 116019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019.
23. Ting Y., Zhao W., HaiTao L., Kai Z., JunTao L.,HanMeng L., YanYun L., LiPing A., JuaLin W., Yujie S., Zheng Y., YueXing Z., Huijan W., XueLi C., YongLin C. MFe_2O_4/biochar composites in persulfate-advanced pxidation process for antibiotic treatment: A mini review. Journal of Water Process Engineering. 2024; 68: 106535. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106535.
24. Mehta D., Pragnesh N.D., Kumar V.V. Toxic crystal violet removal by novel, eco-friendly seablite biochar-ferrite composite: adsorption isotherm, kinetics, and artificial neural network. RSC Advances. 2025; 15 (40): 33189-33208. DOI: https://doi.org/10.1039/d5ra04604a.
25. Bai M., Chai Y., Anwei Chen A., Yuan J. Enhancing cadmium removal efficiency through spinel ferrites modified biochar derived from agricultural waste straw. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022; 11 (1): 109027. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109027.

26. Dong C.D., Chen C.W., Hung C.M. Persulfate activation with rice husk-based magnetic biochar for degrading PAEs in marine sediments. Environ SciPollut Res. 2019; 26: 33781–33790. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-018-2423-2.
27. Chandra S., Jagdale P., Medha I., Tiwari A.K., Bartoli M., De Nino A., Olivito F. Biochar-Supported TiO_2-Based Nanocomposites for the Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole in Water – A Review. Toxics. 2021; 9 (11): 313. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics9110313.
28. Katika R.M., BodduS. Advanced photocatalysis with biochar-TiO_2 composite for efficient oxidation of Congo red dye. Environ Monit Assess. 2025; 197: 831. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-025-14290-1.
29. Abdu M., Tibebu S., Babaee S., Worku A., Msagati T. A.M., Nure J.F. Optimization of photocatalytic degradation of Eriochrome Black Y from aqueous solution using TiO_2-biochar composite. Results of Engineering. 2025; 25: 104036. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104036.
30. Du Y., Ye X., Hui Z., Jiao D., Xie Y., Chen S., Ding J. Synergistic effect of adsorption-photocatalytic reduction of Cr (VI) in wastewater with biochar/TiO_2 composite under simulated sunlight illumination. Physical Chemistry Chemical Physics. 2024; 26: 15891-15901. DOI: https://doi.org/10.1039/D4CP01226G.
31. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the granulometric and morphological composition of coal powders. Chemistry for Sustainable Development. 2021; 29: 525–535.DOI:10.15372/CSD2021330.
32. Крысанова К.О., Крылова А.Ю., Пудова Я.Д., Борисов А.В. Исследование минеральных компонентов биоуглей из опила, полученных низкотемпературными методами. Уголь.2021; 12(1149):41-43.DOI: https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-12-41-43. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47428321.
33. Крылова А.Ю., Горлов Е.Г., Шумовский А. В. Получение биоугля пиролизом биомассы. Химия твердого топлива. 2019; 6: 55-64. DOI: https://doi.org/10.1134/S0023117719060100URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=41140404.
34. Basak M., Rahman L.,Ahmed F.,Biswas B., Sharmin N. The use of X-ray diffraction peak profile analysis to determine the structural parameters of cobalt ferrite nanoparticles using Debye-Scherrer, Williamson-Hall, Halder-Wagner and Size-strain plot: Different precipitating agent approach. Journal of Alloys and Compounds. 2022; 895 (2). 162694.DOI:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162694.
35. Islam A.M., Ishtiaque S.M., Mamun M. A., S. Hoque S.M. Effect of particle size and composition on local magnetic hyperthermia of chitosan-$Mg_{1-x}Co_xFe_2O_4$nanohybrid. Frontiers in Chemistry. 2024; 12: 1-23. DOI: https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1347423.
36. Nha T.T.N., Toan D.N.,Nam Ph. H., Manh D.H., Khan D.Th., PhongPh.Th. Determine elastic parameters and nanocrystalline size of spinel ferrites MFe_2O_4 (M = Co, Fe, Mn, Zn) through X-ray diffraction and infrared spectrum: Comparative approach. Journal of Alloys and Compounds. 2024; 996: 174773. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174773.
37. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguen L.H. Development of biochar supported $NiFe_2O_4$ composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively remove moxifloxacin from wastewater. Chemical Engineering Journal Advances. 2023; 16: 100550. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100550.
38. Sanaz A., Saeid S., Mahboobeh Z., Hossein S. Development of functionalized biochar composites for enhanced boron adsorption from aqueous solutions. Heliyon. 2025; 11 (2): e41720. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41720.
39. Zhang X., Zhao B., Liu H., Zhao Y., Li L. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. Environmental Technology & Innovation. 2022; 26: 102288.1-11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288 .
40. Usharani T., Baskar R., Palanisamy B., Myilsamy M. Efficient photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol over mesoporous Zr and Ce co-doped TiO_2 under visible light. Desalination and Water Treatment. 2021; 217: 320-328. DOI: https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26901.

References

1. Fito J., Van Hulle S.W.H. Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability.Environment, Development and Sustainability. 2021; 23: 2949–2972. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-020-00732-y.
2. Du Plessis A. Persistent degradation: global water quality challenges and required actions. One Earth. 2022; 5: 129–131. DOI: https://doi.org/10.1016/j. oneear.2022.01.005.
3. Rong W., Zhipeng T., Chenyang Z., Wei S., Zhuo C., Xin W., Mengqi L. Research progress on heavy metal wastewater treatment in the integrated circuit industry: From pollution control to resource utilization. Separation and Purification Technology. 2025; 376(2): 134033. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134033.
4. Ruzgar A., Karatas Y., Yurderi M., Sener L., Gulcan M., ZahmakiranM.Synthesis, characterization, and determination of the catalytic roles of tungsten (VI) oxide-supported Pd (0) nanoparticles in the reduction of nitroaromatic pollutants. Materials Chemistry and Physics. 2025; 346: 131368. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131368.
5. Gautam N., Deka D., Das G. Efficient adsorption of nitroaromatic compounds from reusable hierarchical porous biochar emanates from the Ananascomosus crown and Citrus limetta fibers. Chemical Engineering Science. 2025; 308: 121408. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121408.
6. Sangamithirai D., Gopi Krishna K.R., Pandurangan A. Investigating the synergistic effect of RuO_2 nanoparticle-decorated V_2O_5nanoflakes for sensitive detection of 2,4-dinitrophenol and 2,4-dinitrotoluene. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2024; 970: 118554. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118554.
7. Meira A.C.R., Mezalira D.Z., Tondo D.W., Bail A., Arizaga G.G.C., Domingos J.B., Giona R.M. Efficient and versatile catalyst for nitrobenzene compounds reduction based on magnetite coated with semi-metallic bismuth. Applied Surface Science. 2025; 684: 161866. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161866.
8. Fito J., Kefeni K.K., Nkambule T.I. The potential of biocah-photocatalytic nanocomposites for removal of organic micropollutions from wastewater. Science of The Total Environment. 2022; 829: 154648. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154648.
9. Soifi A., Hajjaoui H., Elmoubarki R., Abdennouri M. Spinel ferrites nanoparticles: Synthesis methods and application in heterogeneous Fenton oxidation of organic pollutants. Applied Surface Science Advances. 2021; 6: 100145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100145.
10. Tomina E.V., Khodosova N.A., Sinel'nikov A.A., Zhabin A.V., Kurkin N.A., Novikova L.A. Vliyaniemetodaformirovaniyakompozitananorazmernyi $CoFe_2O_4$/nontronitna ego strukturuisvoistva. [The effect of the method of forming a nanosized $CoFe_2O_4$/nontronite composite on its structure and properties]. Rossiyskiyzhurnal«Kondensirovannyesredyimezhfaznyegranitsy» = Russian Journal of Condensed Matter and Interphase Boundaries». 2022; 24 (3): 379–386. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9861.
11. Jarariya R., Suresh K. Spinel ferrite nanomaterials - $MgFe_2O_4$ - Synthesis by appropriate microwave solution combustion (Msc) method of visible light–responsive photocatalyst for Rb21 dye degradation.Materials Today: Proceedings. 2022; 34: 104576. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.393.
12. Gerbaldo M.V., Peralta M.F., Marchetti S.G., Mendoza S.M., Elias V.R., Crivello M.E., Mendieta S.N. Innovative spinel ferrites for efficient photocatalytic mineralization of carbamazepine in wastewater. Applied Surface Science. 2025; 698: 163132. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163132.
13. Sharma A., Basant Lal B., Somvanshi A., Suman, Alsayari A., Wahab Sh., Lakshmaiya N., Ravi K., Jasrotia R.Advanced functional spinel ferrite based nanomaterials for targeted wastewater treatment. Journal of Molecular Structure. 2025; 1351(2): 144284. DOI:https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.144284.
14. Tomina E.V., Doroshenko A.V., Novikova L.A., Tyupina E.A., Kamzin A.S., Zhuzhukin K.V.,Kopylov A.V.Synthesis, characterization, catalytic activity and adsorption properties of new nanosized cobalt-magnesium spinel ferrites for water treatment processes. Molecular Catalysis. 2025; 582: 115178. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mcat.2025.115178.
15. Xia L., Li X., Wei Z., Liu A., Chen J., Shang J. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. Chemical Engineering Journal. 2025; 525: 170068.

DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068.
16. Elaadssi Y., Madigou V., Arab M. Cobalt ferrites $Co_xFe_{3-x}O_4$ (x = 1 and x = 1.5) as photocatalysts under simulated sunlight: An experimental study coupled to predictive RSM approach. Surfaces and Interfaces. 2025; 68: 106655. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106655.
17. Hamad H.A., Adel M., Emara M.M., Elsenety M., Mohamed I., Bedir A.G., Gargar Z., Abouelela M.M., Eldeeb N.A., Ibrahim I., Hassan A.A., Abboubi M.E., Amin K.M. Ferrites/carbon allotropes nanocomposites for photocatalytic applications: A review. Coordination Chemistry Reviewsl. 2025; 534: 216537. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216537.
18. Mao X., Liu Y., Long Sh. Research progress on adsorption mechanisms and regeneration applications of modified biochar for heavy metals in wastewater. Desalination and Water Treatment. 2025; 324: 101399. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101399.
19. Jiang Y., Gao L., Dai J., Xie D., Li C., Xiong H., Zhang J., Xu Q., Wang J., Tan Y. Enhanced thermal stability and moisture toleration for toluene catalytic decomposition over $MnCoO_x$ supported hierarchical porous biochars with CeO_2 encapsulation. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025; 13 (2): 115493. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115493.
20. Lu X., Xinlan L., Zhuojun W., Ang L., Jianqiu C., Jingge S. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. Chemical Engineering Journal. 2025; 525: 170068. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068.
21. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguyen L.H. Development of biochar supported $NiFe_2O_4$ composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively removemoxifloxacin from wastewater. Chemical Engineering Journal Advances. 2023; 16: 1005050. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100550.
22. Dong X., Chu Y., Tong Z., Sun M., Meng D., Yi X., Gao T., Wang M., Duan J. Mechanisms od adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024; 272: 116019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019.
23. Ting Y., Zhao W., HaiTao L., Kai Z., JunTao L.,HanMeng L., YanYun L., LiPing A., JuaLin W., Yujie S., Zheng Y., YueXing Z., Huijan W., XueLi C., YongLin C. MFe_2O_4/biochar composites in persulfate-advanced pxidation process for antibiotic treatment: A mini review. Journal of Water Process Engineering. 2024; 68: 106535. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106535.
24. Mehta D., Pragnesh N.D., Kumar V.V. Toxic crystal violet removal by novel, eco-friendly seablite biochar-ferrite composite: adsorption isotherm, kinetics, and artificial neural network. RSC Advances. 2025; 15 (40): 33189-33208. DOI: https://doi.org/10.1039/d5ra04604a.
25. Bai M., Chai Y., Anwei Chen A., Yuan J. Enhancing cadmium removal efficiency through spinel ferrites modified biochar derived from agricultural waste straw. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022; 11 (1): 109027. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109027.
26. Dong C.D., Chen C.W., Hung C.M. Persulfate activation with rice husk-based magnetic biochar for degrading PAEs in marine sediments. Environ SciPollut Res. 2019; 26: 33781–33790. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-018-2423-2.
27. Chandra S., Jagdale P., Medha I., Tiwari A.K., Bartoli M., De Nino A., Olivito F. Biochar-Supported TiO_2-Based Nanocomposites for the Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole in Water – A Review. Toxics. 2021; 9 (11): 313. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics9110313.
28. Katika R.M., BodduS. Advanced photocatalysis with biochar-TiO_2 composite for efficient oxidation of Congo red dye. Environ Monit Assess. 2025; 197: 831. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-025-14290-1.
29. Abdu M., Tibebu S., Babaee S., Worku A., Msagati T. A.M., Nure J.F. Optimization of photocatalytic degradation of Eriochrome Black Y from aqueous solution using TiO_2-biochar composite. Results of Engineering. 2025; 25: 104036. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104036.
30. Du Y., Ye X., Hui Z., Jiao D., Xie Y., Chen S., Ding J. Synergistic effect of adsorption-photocatalytic reduction of Cr (VI) in wastewater with biochar/TiO_2 composite under simulated sunlight illumination. Physical Chemistry Chemical Physics. 2024; 26: 15891-15901. DOI: https://doi.org/10.1039/D4CP01226G.
31. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the granulometric and morphological composition of coal powders. Chemistry for Sustainable Development. 2021; 29: 525–535. DOI:10.15372/CSD2021330.

32. Krysanova K.O., Krylova A.Yu., Pudova Ya.D., Borisov A.V. Issledovanie mineral'nykh komponentov biouglei iz opila, poluchennykhn iz kotemperaturnymi metodami.[Research on the mineral components of bio-coal from sawdust obtained by low-temperature methods]. Rossiyskiy zhurnal«Ugol'» = Russian Journal «Coal». 2021; 12 (1149): 41-43. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-12-41-43 URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47428321.
33. Krylova A.Yu., Gorlov E.G., Shumovskii A. V. Poluchenie biouglya pirolizom biomassy. [Production of biochar by biomass pyrolysis]. Rossiyskiy zhurnal«Khimiya tverdogo topliva» =Russian Journal «Solid fuel chemistry». 2019; 6: 55-64. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.1134/S0023117719060100 URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=41140404.
34. Basak M., Rahman L.,Ahmed F.,Biswas B., Sharmin N. The use of X-ray diffraction peak profile analysis to determine the structural parameters of cobalt ferrite nanoparticles using Debye-Scherrer, Williamson-Hall, Halder-Wagner and Size-strain plot: Different precipitating agent approach. Journal of Alloys and Compounds. 2022; 895 (2). 162694.DOI:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162694.
35. Islam A.M., Ishtiaque S.M., Mamun M. A., S. Hoque S.M. Effect of particle size and composition on local magnetic hyperthermia of chitosan-$Mg_{1-x}Co_xFe_2O_4$nanohybrid. Frontiers in Chemistry. 2024; 12: 1-23. DOI: https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1347423.
36. Nha T.T.N.,Toan D.N., Nam Ph. H., Manh D.H., Khan D.Th., PhongPh.Th. Determine elastic parameters and nanocrystalline size of spinel ferrites MFe_2O_4 (M = Co, Fe, Mn, Zn) through X-ray diffraction and infrared spectrum: Comparative approach. Journal of Alloys and Compounds. 2024; 996: 174773. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174773.
37. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguen L.H. Development of biochar supported $NiFe_2O_4$ composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively remove moxifloxacin from wastewater. Chemical Engineering Journal Advances. 2023; 16: 100550. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100550.
38. Sanaz A., Saeid S., Mahboobeh Z., Hossein S. Development of functionalized biochar composites for enhanced boron adsorption from aqueous solutions. Heliyon. 2025; 11 (2): e41720. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41720.
39. Zhang X., Zhao B., Liu H., Zhao Y., Li L. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. Environmental Technology & Innovation. 2022; 26: 102288.1-11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288
40. Usharani T., Baskar R., Palanisamy B., Myilsamy M. Efficient photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol over mesoporous Zr and Ce co-doped TiO_2 under visible light. Desalination and Water Treatment. 2021; 217: 320-328. DOI: https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26901.

Сведения об авторах

✉ *Дорошенко Алёна Владимировна* – преподаватель кафедры химии и биотехнологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7487-5078, e-mail: al.doroschencko2016@yandex.ru

Бережная Мария Викторовна – кандидат химических наук, преподаватель кафедры химии и биотехнологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3511-8645, e-mail: cnurova2010@yandex.ru

Томина Елена Викторовна – доктор химических наук, зав. кафедрой химии и биотехнологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087,доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5222-0756, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

Information about the authors

Alyona V. Doroshenko - a lecturer at the Department of Chemistry and Bioltechnology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7487-5078, e-mail: al.doroschencko2016@yandex.ru

Maria V. Berezhnaya– Candidate of Chemical Sciences, Lecturer at the Department of Chemistry and Bioltechnology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3511-8645, e-mail: cnurova2010@yandex.ru

Elena V. Tomina– Doctor of Chemical Sciences, Head of the Department of Chemistry and Bioltechnology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, Associate Professor of the Department of Materials Science and Industry of Nanosystems, Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, Russian Federation, 394018 ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5222-0756, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/20
УДК 630* 691.32:674.815:678.686

Инновационные композиционные материалы на основе цемента, древесных отходов и полиэтилентерефталата для промышленного строительства

Тамара Н. Стородубцева[1]✉, tamara-tns@yandex.ru http:// orcid.org/0000-0002-4925-8542
Эдуард А. Черников[1], chernikovea36@mail.ru http:// orcid.org/0000-0002-4106-7207
Оксана И. Шакирова[1], oks.vrn36@yandex.ru
Владимир А. Бондарев[1], mr.bondarev1@bk.ru

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

В условиях растущих требований к экологической устойчивости и снижению себестоимости строительных материалов разработка композитов на основе переработанных компонентов представляет особый научный и практический интерес. В данной работе исследованы прочностные характеристики нового композитного материала на основе цемента, древесных отходов и переработанного ПЭТ. Экспериментальная часть исследования включала лабораторные испытания 30 образцов материала, проведенные в 2024-2025 гг. в соответствии со стандартами ASTM. Результаты показали, что прочность на сжатие материала варьируется в диапазоне 12,4-14,5 МПа, что сопоставимо с характеристиками традиционного керамзитобетона. Прочность на изгиб достигла 3,8-4,5 МПа благодаря армирующему эффекту древесно-полимерных компонентов. Материал демонстрирует высокую морозостойкость, сохраняя более 90% прочности после 50 циклов замораживания-оттаивания, а низкое водопоглощение (4,5%) обеспечивает его долговечность в условиях повышенной влажности. Ключевыми преимуществами разработанного композита являются конкурентоспособные прочностные характеристики, повышенная долговечность и экологическая эффективность за счет использования вторичных материалов. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением долгосрочного поведения материала в различных климатических условиях и оптимизацией его реологических свойств.

Ключевые слова: *композиционные материалы, древесные отходы, полиэтилентерефталат, цемент, песок, прочностные характеристики*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.
Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Инновационные композиционные материалы на основе цемента, древесных отходов и полиэтилентерефталата для промышленного строительства / Т. Н. Стородубцева, Э. А. Черников, О. И. Шакирова, В. А. Бондарев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 343-355. – *Библиогр.: 350-354 (31 назв.)*. DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/20.

Поступила 20.06.2025. **Пересмотрена** 15.10.2025. **Принята** 30.11.2025. **Опубликована онлайн** 26.12.2025.

Article

Innovative composite materials based on cement, wood waste and polyethylene terephthalate for industrial construction

Tamara N. Storodubtseva[1], tamara-tns@yandex.ru http:// orcid.org/0000-0002-4925-8542
Eduard A. Chernikov[1], chernikovea36@mail.ru http:// orcid.org/0000-0002-4106-7207
Oksana I. Shakirova[1], oks.vrn36@yandex.ru
Vladimir A. Bondarev[1], mr.bondarev1@bk.ru
[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

Abstract

In the context of growing demands for environmental sustainability and cost reduction of construction materials, the development of composites based on recycled components is of particular scientific and practical interest. This study investigates the strength characteristics of a new composite material based on cement, wood waste, and recycled PET. The experimental part of the research included laboratory tests of 30 material samples conducted in 2024-2025 in accordance with ASTM standards. The results showed that the compressive strength of the material ranges from 12.4 to 14.5 MPa, which is comparable to the characteristics of traditional expanded clay concrete. The flexural strength reached 3.8-4.5 MPa due to the reinforcing effect of the wood-polymer components. The material demonstrates high frost resistance, retaining over 90% of its strength after 50 freeze-thaw cycles, while low water absorption (4.5%) ensures its durability under high humidity conditions. The key advantages of the developed composite are competitive strength characteristics, increased durability, and environmental efficiency through the use of secondary materials. Future research prospects are associated with studying the long-term behavior of the material in various climatic conditions and optimizing its rheological properties.

Keywords: *composite materials, wood waste, polyethylene terephthalate, cement, sand, strength characteristics*

Funding: The study was supported by an internal scientific grant.
Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the review.
Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Storodubtseva T. N., Chernikov E. A., Shakirova O. I., Bondarev V. A. (2025). Innovative composite materials based on cement, wood waste and polyethylene terephthalate for industrial construction. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 343-355. (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/20.

Received 20.06.2025. **Revised** 15.10.2025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

Введение

Современная строительная отрасль переживает смену парадигмы сторону устойчивого развития, где ключевое значение приобретают материалы, сочетающие экологическую безопасность и

высокие эксплуатационные характеристики [1]. Композиты на основе цемента, древесных отходов и полиэтилентерефталата (ПЭТ) представляют особый интерес благодаря возможности утилизации промышленных отходов и создания материалов с программируемыми свойствами [2]. Многочисленные исследования демонстрируют потенциал таких систем для применения в промышленном строительстве, что обусловлено их способностью удовлетворять требованиям как к механическим характеристикам, так и к тепловой эффективности [3].

Переходя к фундаментальным аспектам создания композитов, следует отметить, что основной проблемой является обеспечение совместимости разнородных компонентов [4]. Экспериментальные исследования выявили, что водорастворимые экстрактивные вещества древесины значительно ингибируют процессы гидратации цемента [5]. Для решения этой проблемы предложены различные методы предварительной модификации древесных заполнителей, включая химическую обработку и термическую модификацию, которые позволяют минимизировать негативное влияние органической фазы на формирование цементного камня [6].

В контексте оптимизации структуры материала особый интерес представляют работы по созданию тройных систем "цемент-древесина-ПЭТ" [7]. Проведенные исследования демонстрируют, что ПЭТ-волокна, введенные в оптимальном количестве, способны не только компенсировать хрупкость древесно-цементной матрицы, но и существенно улучшить ее прочностные характеристики [8]. Микроструктурный анализ подтверждает, что при использовании специальных модифицирующих добавок происходит формирование устойчивых межфазных границ, обеспечивающих эффективное перераспределение напряжений в композитной системе [9].

Рассматривая функциональные характеристики разрабатываемых материалов, следует подчеркнуть их уникальное сочетание механических и теплофизических свойств [10]. Достигаемые значения прочности при сжатии позволяют использовать композиты в конструкционных элементах промышленных зданий, в то время как пониженная плотность и улучшенные теплоизоляционные характеристики открывают возможности для их применения в ограждающих конструкциях [11]. Важным аспектом является изучение долговечности материалов в различных условиях эксплуатации, где проведенные испытания подтверждают сохранение эксплуатационных характеристик при циклическом замораживании-оттаивании и воздействии агрессивных сред [12].

Что касается технологических аспектов производства, то современные исследования охватывают широкий спектр процессов переработки композитных смесей [13]. Наибольшую эффективность демонстрируют методы, основанные на прессовании и экструзии, которые обеспечивают достижение высокой степени однородности структуры материала [14]. Разработанные реологические модели позволяют точно прогнозировать поведение композитных смесей на различных стадиях переработки, что является важным условием для оптимизации технологических параметров [15].

Перспективным направлением представляется адаптация аддитивных технологий для производства элементов строительных конструкций [16]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что образцы, полученные методом 3D-печати, демонстрируют соответствие предъявляемым требованиям как по точности геометрических параметров, так и по стабильности физико-механических характеристик, что открывает новые возможности для цифровизации строительной отрасли [17].

Анализируя экологические аспекты, необходимо отметить, что комплексная оценка

жизненного цикла подтверждает значительный потенциал разрабатываемых материалов в контексте устойчивого развития [18]. Расчеты демонстрируют существенное снижение углеродного следа по сравнению с традиционными строительными решениями, при этом особое внимание уделяется вопросам утилизации материалов после окончания срока службы [19]. В экономическом плане анализ свидетельствует о целесообразности внедрения композитов при наличии стабильных источников сырьевых ресурсов, где оптимизация транспортных потоков позволяет минимизировать затраты на производство [20].

Переходя к вопросам практической реализации, следует отметить накопленный опыт применения композитных материалов в виде стеновых панелей, теплоизоляционных материалов и элементов несъемной опалубки [21]. Проведенные натурные испытания подтвердили соответствие заявленных характеристик реальным эксплуатационным условиям, при этом особый интерес представляют разработки в области создания многофункциональных строительных систем, сочетающих несущую способность и энергоэффективность [22].

Цель работы - разработка и изучение свойств инновационного композиционного строительного материала на основе портландцемента, древесных отходов (опилок и стружки) и переработанного полиэтилентерефталата (ПЭТ). Исследование направлено на создание конкурентоспособного материала с высокими механическими и эксплуатационными характеристиками, пригодного для применения в строительстве.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований
Объектом исследования являются композиционные материалы на основе цемента, модифицированные древесными отходами и переработанным полиэтилентерефталатом. Предмет исследования - строительный материал, обладающий высокими технико-механическими характеристиками, полученный путем рационального сочетания цементной матрицы, древесного наполнителя и полимерной фазы.

Характеристика сырьевых материалов
В качестве основного вяжущего использовался портландцемент марки М400 со средней плотностью 3,0-3,2 г/см³, удельной поверхностью 300-350 м²/кг и стандартными сроками схватывания: начало - не ранее 45 минут, конец - не позднее 10 часов. Прочностные показатели цемента составляли: прочность на сжатие в 28 суток 39,2-49,0 МПа, прочность на изгиб 5,4-6,4 МПа.

Древесная составляющая включала два фракционных типа отходов: мелкодисперсные опилки размером 0,1-1 мм с влажностью 8-12% и древесную стружку размером 1-5 мм с плотностью 350-450 кг/м³ и зольностью не более 1,5%. Химический состав древесных отходов характеризовался содержанием целлюлозы 40-50%, лигнина 20-30%, гемицеллюлоз 15-25% и экстрактивных веществ 2-5%(рисунок 1).



Рисунок 1. Древесная стружка
Figure 1. Wood shavings
Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Полимерный компонент представлял собой хлопья из переработанного ПЭТ с размером частиц 2-8 мм, толщиной 0,2-0,5 мм, плотностью 1,38 г/см³, температурой плавления 220-230°С и степенью кристалличности 30-40%.

Методика подготовки компонентов
Древесные отходы подвергались предварительной сушке до остаточной влажности 3-5%. Подготовка ПЭТ-компонента включала механическое

измельчение, воздушную сепарацию и поверхностную активацию 10% раствором NaOH. Критериями отбора материалов служили постоянство физико-химических характеристик, отсутствие токсичных примесей и воспроизводимость свойств (рисунок 2).



Рисунок 2. Сушильный шкаф
Figure 2. Drying cabinet
Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Требования к качеству компонентов
Для древесных наполнителей установлены требования: содержание коры не более 5%, отсутствие грибковых поражений, однородность фракционного состава. Для ПЭТ-компонента определены: степень очистки от органических загрязнений не ниже 90%, содержание полиолефинов не более 5%.

Предложенный состав и методика подготовки компонентов обеспечивают точное дозирование, контролируемое фазовое взаимодействие в композите и воспроизводимость экспериментальных результатов.

Методология экспериментальных исследований

Критерии качества компонентов
К древесным наполнителям предъявлялись специальные требования, включающие ограничение массовой доли коры до 5%, отсутствие микологических поражений и высокая степень однородности фракционного состава. Для полимерной составляющей регламентировалась степень очистки от органических загрязнений не менее 90% при максимальном содержании полиолефинов 5%. Подобный подход к подбору компонентного состава обеспечил возможность прецизионного дозирования, управляемого фазового взаимодействия в композитной системе и воспроизводимости экспериментальных данных.

Технология получения опытных образцов
Процесс изготовления образцов осуществлялся в два технологических этапа. На подготовительной стадии проводили кондиционирование древесных компонентов путем сушки до нормативной влажности и механическую очистку ПЭТ-хлопьев от поверхностных загрязнений.

Ключевой операцией являлся процесс карамелизации, реализуемый при термомеханическом воздействии в смесительном оборудовании при температуре 230°C в течение 15-20 минут. В данных режимных параметрах достигалось полное обволакивание древесных частиц полимерной пленкой без термической деструкции целлюлозной составляющей(рисунок 3).



Рисунок 3. Гранулы карамелизованных в ПЭТ древесных отходов
Figure 3. Caramelized wood waste pellets in PET
Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

На основном технологическом этапе осуществляли последовательное введение компонентов в бетоносмеситель. Первоначально проводили гомогенизацию карамелизованных гранул с кварцевым песком фракции 0,1-0,6 мм в течение 5-7 минут, в результате чего абразивное воздействие песчаных частиц создавало развитую адгезионную поверхность на гранулах. Затем вводили цементное вяжущее с последующим затворением системы расчетным количеством воды.

Реологические параметры смеси
Свежеприготовленная смесь характеризовалась следующими технологическими показателями:

- подвижность по методике СтройЦНИЛ составляла 3-4 см;

- сроки сохранения удобоукладываемости находились в интервале 90-120 минут;
- средняя плотность смеси варьировалась в пределах 1150-1250 кг/м³.

Формование опытных образцов для механических испытаний выполняли методом вибропрессования (рисунок 4) с последующим твердением в нормальных условиях (рисунок 5).



Рисунок 4. Лабораторное вибропрессовое оборудование
Figure 4. Laboratory vibratory pressing equipment
Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Методы оценки свойств композита

Для комплексной характеристики материала применяли стандартизированные методы испытаний. Определение прочности на сжатие проводили на образцах-кубах размером 100×100×100 мм в соответствии с требованиями ГОСТ в возрасте 7, 28 и 90 суток. Испытания выполняли на прессах с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения образцов.

Водопоглощение оценивали гравиметрическим методом после выдержки образцов в водной среде в течение 24 и 72 часов. Данный показатель является критически важным для прогнозирования долговечности материала в условиях эксплуатации при повышенной влажности.

Морозостойкость определяли путем циклических испытаний, включающих 50 последовательных циклов замораживания при -20°C и оттаивания при +20°C. После завершения циклических воздействий проводили оценку изменения прочностных характеристик и визуальный анализ состояния поверхности образцов.

Дополнительно выполняли испытания на стойкость к химическим воздействиям и УФ-излучению для оценки эксплуатационной стабильности материала в различных условиях.



Рисунок 5. Опытный образец строительного блока
Figure 5. Prototype of a building block
Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Применение комплекса теоретических и экспериментальных подходов позволило провести всестороннюю оценку свойств нового композиционного материала и обосновать перспективность его применения в промышленном строительстве.

Результаты

Проведенные испытания позволили получить комплексную характеристику свойств разработанного композиционного материала. Установлено, что его прочностные показатели находятся на конкурентоспособном уровне. Так, прочность на сжатие в возрасте 28 суток достигает значений 12,5–14,5 МПа, что не только сопоставимо с традиционными легкими бетонами, такими как арболит и газобетон, но и превосходит характеристики керамзитобетона, демонстрируя потенциал для применения в конструкционных

элементах малоэтажных зданий. Наблюдаемое увеличение прочности, по-видимому, обусловлено синергетическим эффектом от введения древесных и полимерных отходов, которые, модифицируя структуру цементной матрицы, способствуют формированию более плотного и устойчивого композита.

Аналогичная тенденция отмечается и при оценке прочности на изгиб, значение которой составило 3,8–4,5 МПа. Данный результат, находящийся в верхней границе характерного для цементных систем диапазона (3–5 МПа), подтверждает армирующую роль наполнителей. Древесные частицы и хлопья ПЭТ эффективно препятствуют распространению трещин, повышая сопротивление материала механическим деформациям и тем самым продлевая его эксплуатационный ресурс.

Важным аспектом исследования стала оценка долговечности материала в условиях внешних воздействий. Показатель морозостойкости, выражающийся в сохранении более 90% первоначальной прочности после 50 циклов замораживания и оттаивания, свидетельствует о высокой структурной стабильности композита и позволяет рекомендовать его для использования в регионах с холодным климатом. Существенное влияние на долговечность оказывает и низкое водопоглощение материала, не превышающее 4,5% по массе. Этот результат, достигнутый благодаря гидрофобизирующему эффекту ПЭТ-компонента, кратно превышает аналогичные показатели для традиционных цементных композитов (15–20%) и значительно снижает риск деградации материала в условиях повышенной влажности.

С точки зрения устойчивого развития, ключевым преимуществом разработанного материала является его значительный экологический потенциал. Интеграция в состав композита до 70% вторичных ресурсов не только позволяет снизить нагрузку на полигоны промышленных отходов, но и минимизирует потребление первичного сырья, что соответствует принципам экономики замкнутого цикла. Таким образом, проведенная работа демонстрирует возможность создания строительного материала, который сочетает в себе удовлетворительные механические свойства, повышенную долговечность и улучшенные экологические характеристики.

Обсуждение

Разработка композиционного материала на основе цемента, древесных отходов и переработанного полиэтилентерефталата демонстрирует комплексный подход к созданию современных строительных решений. Полученные результаты свидетельствуют о синергетическом эффекте при комбинировании указанных компонентов, что позволяет одновременно решать задачи улучшения эксплуатационных характеристик и повышения экологической эффективности строительных материалов [23].

Анализ роли переработанного ПЭТ в структуре композита выявил его многофункциональное воздействие. Высокая химическая стойкость полимерной фазы способствует значительному повышению долговечности материала в условиях агрессивных сред [24]. Как показали исследования, ПЭТ-хлопья выполняют не только гидрофобизирующую функцию, но и армирующую роль, способствуя перераспределению механических напряжений в цементной матрице и препятствуя развитию трещин [25]. Данный эффект подтверждается полученными значениями прочности на изгиб, превышающими аналогичные показатели для традиционных легких бетонов.

Древесные отходы в составе композита обеспечивают комплекс технологических преимуществ. Снижение средней плотности материала до 1150-1250 кг/м³ при сохранении достаточной прочности на сжатие (12,5-14,5 МПа) позволяет оптимизировать нагрузку на строительные конструкции [26]. Теплоизоляционные свойства древесного наполнителя, характеризующиеся коэффициентом теплопроводности 0,14 Вт/(м·К), соответствуют современным требованиям энергоэффективности [27].

Сравнительный анализ с традиционными материалами демонстрирует существенные

преимущества разработанного композита. В отличие от керамзитобетона, характеризующегося повышенной плотностью и относительно высокой теплопроводностью, предложенный материал сочетает достаточную прочность с улучшенными теплоизоляционными свойствами [6]. По сравнению с газобетоном, композит демонстрирует лучшие показатели влагостойкости и морозостойкости, что расширяет возможности его применения в различных климатических условиях [28].

Экологический аспект разработки заслуживает особого внимания. Использование до 70% вторичных материалов в составе композита соответствует принципам циркулярной экономики и способствует решению проблемы утилизации промышленных отходов [29]. Организация производства строительных изделий на предприятиях деревообрабатывающей промышленности создает предпосылки для формирования замкнутых технологических циклов и снижения транспортных издержек [30,31].

Выводы

Проведенное исследование позволило установить научно обоснованные закономерности формирования структурно-механических свойств композиционных материалов на основе цементной матрицы, модифицированной древесными отходами и полиэтилентерефталатом. Экспериментальные данные свидетельствуют о достижении оптимального баланса прочностных характеристик и эксплуатационных параметров разработанного композита.

Полученные результаты демонстрируют, что прочностные показатели материала находятся на уровне 12,4-14,5 МПа при сжатии и 3,8-4,5 МПа при изгибе, что соответствует требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам в малоэтажном строительстве. Установлено, что введение полимерной фазы способствует формированию армированной структуры с улучшенными деформативными характеристиками.

Исследование долговечности материала выявило его повышенную стойкость к циклическим температурным воздействиям. Сохранение 92-95% первоначальной прочности после 50 циклов замораживания-оттаивания свидетельствует о структурной стабильности композитной системы. Низкие значения водопоглощения (4,2-4,8%) доказывают эффективность гидрофобизирующего действия полимерного компонента.

Существенным достижением работы является научное обоснование возможности интеграции вторичных материалов в количестве до 70% от общей массы композита. Установлено, что такая модификация позволяет не только решить проблему утилизации отходов, но и существенно улучшить эксплуатационные характеристики материала при одновременном снижении его себестоимости на 35-40%.

Результаты подтверждают перспективность практического применения разработанного композита в промышленном строительстве. Полученные результаты создают теоретическую базу для дальнейших исследований в области оптимизации состава и структуры многокомпонентных строительных материалов на основе вторичного сырья.

Список литературы

1. Caldarola B., Mazzilli D., Napolitano L., Patelli A., Sbardella A. Economic complexity and the sustainability transition: a review of data, methods, and literature. *Journal of Physics: Complexity*. 2024; 5(2): 022001. DOI: 10.1088/2632-072X/ad4f3d.
2. Ulewicz M. Recycled Materials in Civil Engineering Application. *Materials (Basel)*. 2023; 16(22): 7075. DOI: 10.3390/ma16227075.

3. Albayati A.H., Al-Mosawe H., Maher A.M., Al-Ani A.F., Moudhafar M.M. Performance Evaluation of Composite CNT/PE-Modified Asphalt Concrete at Binder, Mixture, and Pavement Levels. *Civil Engineering Journal*. 2025; 11(10): 4380–4398. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-10-022.
4. Yin F., West R., Powell B., DuBois C.J. Short-Term Performance Characterization and Fatigue Damage Prediction of Asphalt Mixtures Containing Polymer-Modified Binders and Recycled Plastics. *Transportation Research Record*. 2025; 2679(1): 742–759. DOI: 10.1177/03611981221143119.
5. Hasnat M.R., Hassan M.K., Saha S.A. Comprehensive Review of Aluminium Composite Panels: Current Research, Challenges, and Future Research Direction. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(7): 319. DOI: 10.3390/jcs9070319.
6. Xiao J., Han N., Li Y. et al. Review of recent developments in cement composites reinforced with fibers and nanomaterials. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021; 15: 1–19. DOI: 10.1007/s11709-021-0723-y.
7. Srivabut C., Homkhiew C., Rawangwong S. et al. Possibility of using municipal solid waste for manufacturing wood-plastic composites: effects of natural weathering, wood waste types, and contents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022; 24: 1407–1422. DOI: 10.1007/s10163-022-01443-4.
8. Yao X., Pei Z., Zheng H., Guan Q., Wang F., Wang S., Ji Y. Review of Mechanical and Temperature Properties of Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Buildings*. 2022; 12(8): 1224. DOI: 10.3390/buildings12081224.
9. Macías-Silva M.A., Cedeño-Muñoz J.S., Morales-Paredes C.A., Tinizaray-Castillo R., Perero-Espinoza G.A., Rodríguez-Díaz J.M., Jarre-Castro C.M. Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024; 10: 100863. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100863.
10. Turoboś P., Przybysz P. Comparative Study of Cement Composites Reinforced with Cellulose and Lignocellulose Fibers. *Fibers*. 2025; 13(9): 128. DOI: 10.3390/fib13090128.
11. Signorini C., Volpini V. Mechanical Performance of Fiber Reinforced Cement Composites Including Fully-Recycled Plastic Fibers. *Fibers*. 2021; 9(3): 16. DOI: 10.3390/fib9030016.
12. Vaculik S., Matschei T. Fire Resistance of Wood Fiber Reinforced Concrete. In: Amziane S., Merta I., Page J. (eds) *Bio-Based Building Materials. ICBBM 2023. RILEM Bookseries*. 2023; vol 45. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-33465-8_38.
13. Stojkovic M., Butt J. Industry 4.0 Implementation Framework for the Composite Manufacturing Industry. *Journal of Composites Science*. 2022; 6(9): 258. DOI: 10.3390/jcs6090258.
14. Amadi I.G., Mahachi J. Towards Sustainable Concrete: Current Trends and Future Projections of Supplementary Cementitious Materials in South Africa. *Construction Materials*. 2025; 5(3): 70. DOI: 10.3390/constrmater5030070.
15. Amadi I.G., Mahachi J. State-of-the-art review on construction and demolition waste: The South African context. *Cleaner Waste Systems*. 2025; 11: 100251. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100251.
16. Hasibuan G.C.R., Al Fath M.T., Yusof N., Dewi R.A., Syafridon G.G.A., Jaya I., Anas M.R., Syahrizal. Integrating circular economy into construction and demolition waste management: A bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025; 11: 101159. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101159.
17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development. *Construction and Building Materials*. 2025; 488: 142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151.
18. Paglia C., Mosca C., Giner Cordero E. Properties and durability of recycled concrete with mixed granulates: Application for infrastructures. In: *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. 1st ed. CRC Press; 2023.

19. Ghosh G., Bhattacharyya R., Penumadu D. Advances in Multi-functional Composite Materials: Applications and Opportunities in Automotive Industry. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5081906.
20. Fartash Naeimi, E., Selvi, K. Ç., & Ungureanu, N. (2025). Exploring the Role of Advanced Composites and Biocomposites in Agricultural Machinery and Equipment: Insights into Design, Performance, and Sustainability. *Polymers*, *17*(12), 1691. https://doi.org/10.3390/polym17121691
21. Zhao J., Li S., Zhang Z. Integrated composite wall with geopolymer permanent insulation formwork: Interface bonding behavior and mechanism. *Construction and Building Materials*. 2023; 403: 133110. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133110.
22. Li H., Saleh M.S., Zhao J., Wang H., Liu H., Iqbal M.S. Bending performance of a novel geopolymer non-dismantling sandwich insulation formwork: Experimental, theoretical, and numerical simulation. *Engineering Structures*. 2025; 333: 120180. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120180.
23. Oladele I.O., Oki V.O., Omotosho T.F., Adebanjo M.B., Ayanleye O.T., Adekola S.A. Sustainable polymer and polymer-based composite materials for extreme conditions and demanding applications – A review on pushing boundaries in materials science. *Next Materials*. 2025; 8: 100775. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.100775.
24. Li M., Zhong J., Li G., Zhang Q., Cen F., Gao P. Study on the Performance of Polymer-Modified Conductive Cement-Based Materials. *Buildings*. 2023; 13(12): 2961. DOI: 10.3390/buildings13122961.
25. Bao W., Zhao J., Guo B., Li S., Shen J., Liu M., Han J., Xing S., Hu M., Guo J. The Mechanical Reinforcing Mechanism and Self-Healing Properties of Biomimetic Hybrid Cement Composites via In-Situ Polymerization. *Materials*. 2025; 18(16): 3763. DOI: 10.3390/ma18163763.
26. Bołtryk M., Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K. et al. The influence of two-stage mineralization of organic fillers on the properties of cement composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2025; 25: 127. DOI: 10.1007/s43452-025-01170-1.
27. Ba L., Trabelsi A., Ngo T.T., Pliya P., El Abbassi I., Kane C.S.E. Thermal Performance of Bio-Based Materials for Sustainable Building Insulation: A Numerical Study. *Fibers*. 2025; 13(5): 52. DOI: 10.3390/fib13050052.
28. Tan S.Q., Lim N.H.A.S., Saleh A.T., Wei K.E.L., Samadi M., Huseien G.F. A Bibliometric Review of Lightweight Aggregate Geopolymer Concrete. *CivilEng*. 2024; 5(4): 892-927. DOI: 10.3390/civileng5040046.
29. Kočí V., Maděra J., Jerman M. et al. Experimental Determination of Frost Resistance of Autoclaved Aerated Concrete at Different Levels of Moisture Saturation. *International Journal of Thermophysics*. 2018; 39: 75. DOI: 10.1007/s10765-018-2398-8.
30. HaitherAli H., Anjali G. Circular Economy in Construction Sector—a Guideline for Policy Makers from Global Perspective. *Circular Economy and Sustainability*. 2024; 4: 1285–1313. DOI: 10.1007/s43615-023-00321-x.
31. Lindhard S.M., Wyke S., Mahami H., Vaezzadeh S.S., Svidt K. Waste Generation Predictions and On-Site Waste Management: A Danish Perspective. *Sustainability*. 2023; 15(5): 4207. DOI: 10.3390/su15054207.

References

1. Caldarola B., Mazzilli D., Napolitano L., Patelli A., Sbardella A. Economic complexity and the sustainability transition: a review of data, methods, and literature. *Journal of Physics: Complexity*. 2024; 5(2): 022001. DOI: 10.1088/2632-072X/ad4f3d.
2. Ulewicz M. Recycled Materials in Civil Engineering Application. *Materials (Basel)*. 2023; 16(22): 7075. DOI: 10.3390/ma16227075.
3. Albayati A.H., Al-Mosawe H., Maher A.M., Al-Ani A.F., Moudhafar M.M. Performance Evaluation of Composite CNT/PE-Modified Asphalt Concrete at Binder, Mixture, and Pavement Levels. *Civil Engineering Journal*. 2025; 11(10): 4380–4398. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-10-022.

4. Yin F., West R., Powell B., DuBois C.J. Short-Term Performance Characterization and Fatigue Damage Prediction of Asphalt Mixtures Containing Polymer-Modified Binders and Recycled Plastics. *Transportation Research Record*. 2025; 2679(1): 742–759. DOI: 10.1177/03611981221143119.
5. Hasnat M.R., Hassan M.K., Saha S.A. Comprehensive Review of Aluminium Composite Panels: Current Research, Challenges, and Future Research Direction. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(7): 319. DOI: 10.3390/jcs9070319.
6. Xiao J., Han N., Li Y. et al. Review of recent developments in cement composites reinforced with fibers and nanomaterials. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021; 15: 1–19. DOI: 10.1007/s11709-021-0723-y.
7. Srivabut C., Homkhiew C., Rawangwong S. et al. Possibility of using municipal solid waste for manufacturing wood-plastic composites: effects of natural weathering, wood waste types, and contents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022; 24: 1407–1422. DOI: 10.1007/s10163-022-01443-4.
8. Yao X., Pei Z., Zheng H., Guan Q., Wang F., Wang S., Ji Y. Review of Mechanical and Temperature Properties of Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Buildings*. 2022; 12(8): 1224. DOI: 10.3390/buildings12081224.
9. Macías-Silva M.A., Cedeño-Muñoz J.S., Morales-Paredes C.A., Tinizaray-Castillo R., Perero-Espinoza G.A., Rodríguez-Díaz J.M., Jarre-Castro C.M. Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024; 10: 100863. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100863.
10. Turoboś P., Przybysz P. Comparative Study of Cement Composites Reinforced with Cellulose and Lignocellulose Fibers. *Fibers*. 2025; 13(9): 128. DOI: 10.3390/fib13090128.
11. Signorini C., Volpini V. Mechanical Performance of Fiber Reinforced Cement Composites Including Fully-Recycled Plastic Fibers. *Fibers*. 2021; 9(3): 16. DOI: 10.3390/fib9030016.
12. Vaculik S., Matschei T. Fire Resistance of Wood Fiber Reinforced Concrete. In: Amziane S., Merta I., Page J. (eds) *Bio-Based Building Materials. ICBBM 2023. RILEM Bookseries*. 2023; vol 45. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-33465-8_38.
13. Stojkovic M., Butt J. Industry 4.0 Implementation Framework for the Composite Manufacturing Industry. *Journal of Composites Science*. 2022; 6(9): 258. DOI: 10.3390/jcs6090258.
14. Amadi I.G., Mahachi J. Towards Sustainable Concrete: Current Trends and Future Projections of Supplementary Cementitious Materials in South Africa. *Construction Materials*. 2025; 5(3): 70. DOI: 10.3390/constrmater5030070.
15. Amadi I.G., Mahachi J. State-of-the-art review on construction and demolition waste: The South African context. *Cleaner Waste Systems*. 2025; 11: 100251. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100251.
16. Hasibuan G.C.R., Al Fath M.T., Yusof N., Dewi R.A., Syafridon G.G.A., Jaya I., Anas M.R., Syahrizal. Integrating circular economy into construction and demolition waste management: A bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025; 11: 101159. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101159.
17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development. *Construction and Building Materials*. 2025; 488: 142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151.
18. Paglia C., Mosca C., Giner Cordero E. Properties and durability of recycled concrete with mixed granulates: Application for infrastructures. In: *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. 1st ed. CRC Press; 2023.
19. Ghosh G., Bhattacharyya R., Penumadu D. Advances in Multi-functional Composite Materials: Applications and Opportunities in Automotive Industry. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5081906.

20. Fartash Naeimi, E., Selvi, K. Ç., & Ungureanu, N. (2025). Exploring the Role of Advanced Composites and Biocomposites in Agricultural Machinery and Equipment: Insights into Design, Performance, and Sustainability. *Polymers*, *17*(12), 1691. https://doi.org/10.3390/polym17121691
21. Zhao J., Li S., Zhang Z. Integrated composite wall with geopolymer permanent insulation formwork: Interface bonding behavior and mechanism. *Construction and Building Materials*. 2023; 403: 133110. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133110.
22. Li H., Saleh M.S., Zhao J., Wang H., Liu H., Iqbal M.S. Bending performance of a novel geopolymer non-dismantling sandwich insulation formwork: Experimental, theoretical, and numerical simulation. *Engineering Structures*. 2025; 333: 120180. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120180.
23. Oladele I.O., Oki V.O., Omotosho T.F., Adebanjo M.B., Ayanleye O.T., Adekola S.A. Sustainable polymer and polymer-based composite materials for extreme conditions and demanding applications – A review on pushing boundaries in materials science. *Next Materials*. 2025; 8: 100775. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.100775.
24. Li M., Zhong J., Li G., Zhang Q., Cen F., Gao P. Study on the Performance of Polymer-Modified Conductive Cement-Based Materials. *Buildings*. 2023; 13(12): 2961. DOI: 10.3390/buildings13122961.
25. Bao W., Zhao J., Guo B., Li S., Shen J., Liu M., Han J., Xing S., Hu M., Guo J. The Mechanical Reinforcing Mechanism and Self-Healing Properties of Biomimetic Hybrid Cement Composites via In-Situ Polymerization. *Materials*. 2025; 18(16): 3763. DOI: 10.3390/ma18163763.
26. Bołtryk M., Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K. et al. The influence of two-stage mineralization of organic fillers on the properties of cement composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2025; 25: 127. DOI: 10.1007/s43452-025-01170-1.
27. Ba L., Trabelsi A., Ngo T.T., Pliya P., El Abbassi I., Kane C.S.E. Thermal Performance of Bio-Based Materials for Sustainable Building Insulation: A Numerical Study. *Fibers*. 2025; 13(5): 52. DOI: 10.3390/fib13050052.
28. Tan S.Q., Lim N.H.A.S., Saleh A.T., Wei K.E.L., Samadi M., Huseien G.F. A Bibliometric Review of Lightweight Aggregate Geopolymer Concrete. *CivilEng*. 2024; 5(4): 892-927. DOI: 10.3390/civileng5040046.
29. Kočí V., Maděra J., Jerman M. et al. Experimental Determination of Frost Resistance of Autoclaved Aerated Concrete at Different Levels of Moisture Saturation. *International Journal of Thermophysics*. 2018; 39: 75. DOI: 10.1007/s10765-018-2398-8.
30. HaitherAli H., Anjali G. Circular Economy in Construction Sector—a Guideline for Policy Makers from Global Perspective. *Circular Economy and Sustainability*. 2024; 4: 1285–1313. DOI: 10.1007/s43615-023-00321-x.
31. Lindhard S.M., Wyke S., Mahami H., Vaezzadeh S.S., Svidt K. Waste Generation Predictions and On-Site Waste Management: A Danish Perspective. *Sustainability*. 2023; 15(5): 4207. DOI: 10.3390/su15054207.

Сведения об авторах

✉ Стородубцева Тамара Никаноровна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева,8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-4925-8542, e-mail: tamara-tns@yandex.ru.

Черников Эдуард Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева,8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-4106-7207, e-mail: chernikovea36@mail.ru.

Шакирова Оксана Ивановна – старший преподаватель кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева,8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: oks.vrn36@yandex.ru.

Бондарев Владимир Анатольевич – аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева,8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: mr.bondarev1@bk.ru.

Information about the authors

✉ *Tamara N. Storodubtseva* – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov", Timiryazeva St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4925-8542, e-mail: tamara-tns@yandex.ru.

Eduard A. Chernikov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov", Timiryazev St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4106-7207, e-mail: chernikovea36@mail.ru.

Oksana I. Shakirova – Senior Lecturer, Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Timiryazev St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: oks.vrn36@yandex.ru.

Vladimir A. Bondarev – postgraduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov", Timiryazev St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: mr.bondarev1@bk.ru.

✉ – Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/21
УДК 630* 624.131.5:624.131.37

Критический анализ теоретических моделей уплотнения грунтов и выявление их ограничений при прогнозировании предельного состояния

Дмитрий В. Васильев[1], uasya-1993@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0005-6417-846X
Альберт М. Бургонутдинов[1], burgonutdinov.albert@yandex.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-7489-791X
Евгений В. Сибиряткин[2], jey-sib@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0475-612X
Ольга А. Куницкая[3], ola.ola07@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8542-9380

[1] *ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Комсомольский просп., д. 29, Пермь, 614990, Российская Федерация*

[2] *ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация*

[3] *ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация*

Проведен комплексный анализ современных подходов к моделированию процесса уплотнения грунтов, актуальный для решения задач транспортного и промышленного строительства в условиях реализации национальных проектов "Безопасные качественные дороги" и "Комплексное развитие территорий". Исследование охватывает ключевые аспекты механики уплотнения с критической оценкой 6 основных теоретических моделей, включая решения Герца-Беляева, степенные зависимости и зонную модель Калужского.

Установлено, что существующие теоретические модели адекватно описывают лишь начальные стадии уплотнения, демонстрируя расхождение с экспериментальными данными до 45% при прогнозировании предельного состояния грунта. Выявлено фундаментальное противоречие: классические зависимости предсказывают неограниченный рост осадки при увеличении числа проходов катка свыше 15-20 циклов, что не соответствует данным натурных испытаний, показывающим стабилизацию плотности после 8-12 проходов.

На основе сравнительного анализа 23 экспериментальных исследований установлено, что современные модели не учитывают эволюцию прочностных характеристик грунта, что приводит к завышению расчетных значений осадки на 25-30%. Показана необходимость разработки новых адаптивных моделей, учитывающих изменение модуля деформации грунта в процессе уплотнения.

Полученные результаты имеют практическую значимость для цифровизации строительных процессов и могут быть использованы при создании интеллектуальных систем контроля уплотнения, позволяющих снизить энергозатраты на 15-20% и повысить точность прогнозирования несущей способности грунтовых оснований на 25%. Разработанные рекомендации актуальны для внедрения в практику строительства высокоскоростных магистралей и объектов инфраструктуры в сложных грунтовых условиях.

Ключевые слова: *уплотнение грунтов, контактные напряжения, теория Герца-Беляева, коэффициент сопротивления перекатыванию, предельное состояние грунта, число проходов катка, деформационные характеристики грунтов, дорожное строительство, механика грунтов, моделирование процесса уплотнения*

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, https://rscf.ru/project/23-16-00092/.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Критический анализ теоретических моделей уплотнения грунтов и выявление их ограничений при прогнозировании предельного состояния / Д.В. Васильев, А.М. Боргонутдинов, Е.В. Сибиряткин, О.А. Куницкая // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 356-367. – *Библиогр.: с. 365-367 (17 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/21.

Поступила 14.04.2025. ***Пересмотрена*** 15.10. 2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Critical Analysis of Theoretical Models of Soil Compaction and Identification of Their Limitations in Predicting the Ultimate State

Dmitry V. Vasilyev[1], uasya-1993@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0005-6417-846X
Albert M. Burgonutdinov [1], burgonutdinov.albert@yandex.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-7489-791X
Evgeny V. Sibiryatkin[2], jey-sib@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0475-612X
Olga A. Kunitskaya[3], ola.ola07@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8542-9380

[1] *Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Ave., 29, Perm, 614990, Russian Federation*
[2] *Voronezh State University Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*
[3] *Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation*

Abstract

A comprehensive analysis of modern approaches to modeling soil compaction processes has been conducted, relevant for addressing tasks in transport and industrial construction within the framework of national projects "Safe and High-Quality Roads" and "Integrated Development of Territories". The research covers key aspects of compaction mechanics with a critical assessment of 6 main theoretical models, including the Hertz-Belyaev solutions, power-law relationships, and Kaluzhsky's zonal model.

It has been established that existing theoretical models adequately describe only the initial stages of compaction, demonstrating up to 45% discrepancy with experimental data when predicting the ultimate soil state. A fundamental contradiction has been identified: classical dependencies predict unlimited settlement growth with increasing roller passes beyond 15-20 cycles, which contradicts field test data showing density stabilization after 8-12 passes.

Based on a comparative analysis of 23 experimental studies, it has been determined that modern models do not account for the evolution of soil strength characteristics, leading to overestimation of calculated settlement values by 25-30%. The necessity of developing new adaptive models that consider changes in soil deformation modulus during compaction has been demonstrated.

The obtained results have practical significance for the digitalization of construction processes and can be used in creating intelligent compaction control systems, potentially reducing energy costs by 15-20% and improving the accuracy of predicting soil foundation bearing capacity by 25%. The developed recommendations are relevant for

implementation in the construction practice of high-speed highways and infrastructure facilities in complex soil conditions.

Keywords: *soil compaction, contact stresses, Hertz-Belyaev theory, rolling resistance coefficient, ultimate soil state, number of roller passes, soil deformation characteristics, road construction, soil mechanics, compaction process modeling*

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, https://rscf.ru/project/23-16-00092/.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Vasiliev D.V., Borgonutdinov A.M., Sibiryatkin E.V., Kunitskaya O.A. Critical Analysis of Theoretical Models of Soil Compaction and Identification of Their Limitations in Predicting the Ultimate State. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 356-367 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/21.

Received 14.04.2025. ***Revised*** 15.10.2025. ***Accepted*** 30.11. 2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Актуальность проблемы. Комплексный анализ современных подходов к моделированию процесса уплотнения грунтов представляет стратегическую важность для реализации масштабных инфраструктурных проектов в Российской Федерации. В условиях активного развития транспортной системы и реализации национальных проектов "Безопасные качественные дороги" и "Комплексное развитие территорий" проблема эффективного уплотнения грунтов приобретает особую значимость [1]. Современные требования к качеству строительства дорожных одежд и земляных сооружений диктуют необходимость разработки новых, более точных методов прогнозирования поведения грунтов в процессе уплотнения [2,3].

Особую актуальность данное исследование получает в свете задач по импортозамещению и развитию отечественных технологий в дорожном строительстве. Отсутствие надежных расчетных моделей, адаптированных к российским грунтовым условиям и современной уплотняющей технике, приводит к значительным экономическим потерям и снижению долговечности строительных объектов [4,5].

Уплотнение грунтов представляет собой сложный физико-механический процесс, характеризующийся нелинейным поведением трехфазной дисперсной системы. Фундаментальная сложность задачи заключается в необходимости одновременного учета реологических свойств грунтовой массы, кинетики изменения структурных связей и динамики перераспределения фазовых компонентов [6,7].

Исторический анализ позволяет выделить три основных этапа развития теории уплотнения [8-10]. Эмпирико-статистический этап характеризовался накоплением экспериментальных данных и разработкой первых нормативных зависимостей, где ключевым достижением стало введение метода стандартного уплотнения Проктора [9]. Аналитический этап связан с развитием теорий контактного взаимодействия на основе решений Герца-Беляева [11], однако эти модели оказались ограниченно применимы для описания поведения упруго-пластичных грунтовых сред. Современный комплексный этап ознаменовался появлением зонных моделей Калужского [12,13] и развитием компьютерного моделирования, однако даже эти подходы не позволяют адекватно описать процесс уплотнения на всех его стадиях.

Существующие теоретические модели демонстрируют принципиальные расхождения с экспериментальными данными по достижению предельного состояния уплотнения [14-16]. Наблюдается противоречие между дискретным характером моделей и непрерывностью реального процесса уплотнения, а также между статическими параметрами моделей и динамической природой изменения свойств грунта.

Исследование предлагает системный подход к анализу ограничений существующих моделей и обоснованию необходимости разработки адаптивной модели, учитывающей эволюцию деформационных характеристик грунта и накопление пластических деформаций. Практическая значимость работы определяется возможностью создания на ее основе интеллектуальных систем контроля уплотнения и оптимизированных технологических карт производства работ.

Цель исследования - проведение критического анализа существующих теоретических моделей контактного взаимодействия вальца с грунтом и разработка концептуальных основ новой адаптивной модели, позволяющей корректно прогнозировать поведение грунта в процессе многократного нагружения.

Материалы и методы исследования

Методологической основой исследования выступил системный анализ современных теоретических представлений о механике процесса уплотнения грунтов. В работе применен комплексный подход, интегрирующий методы сравнительного моделирования, математического анализа и верификации теоретических положений экспериментальными данными.

Научная новизна методологии заключается в разработке критериев оценки адекватности существующих расчетных моделей, основанных на сопоставлении теоретических предсказаний с результатами натурных испытаний. Для установления корреляционных зависимостей между параметрами уплотняющего воздействия и деформационными характеристиками грунтов использованы аппарат нелинейной регрессии и методы вариационной статистики.

Экспериментальная составляющая исследования базируется на метаанализе репрезентативной выборки научных публикаций, охватывающей широкий спектр грунтовых условий и технологических режимов уплотнения. Верификация теоретических моделей осуществлялась посредством сравнения с данными инструментальных измерений контактных напряжений и деформационных параметров.

Особенностью примененной методологии является учет реологических свойств грунтовой среды и их трансформации в процессе многократного нагружения. Для анализа кинетики изменения структурных связей использованы современные представления механики деформируемого твердого тела с учетом специфики трехфазных дисперсных систем.

Математический аппарат исследования включает методы решения контактных задач теории упругости и пластичности, адаптированные для описания поведения грунтовых сред. Для оценки достоверности полученных результатов применены критерии статистической значимости и методы проверки репрезентативности экспериментальных данных.

Результаты

Проведенное комплексное исследование механизма уплотнения грунтов позволило установить фундаментальные закономерности, определяющие эффективность процесса уплотнения в зависимости от физико-механических свойств грунтовых сред и параметров технологического воздействия. Системный анализ существующих теоретических моделей в сопоставлении с экспериментальными данными выявил необходимость разработки уточненных расчетных зависимостей, адекватно описывающих поведение грунта при многократном нагружении.

В результате критического осмысления классических теорий контактного взаимодействия и современных подходов к моделированию процесса уплотнения сформирована целостная система уравнений, учитывающая реологические свойства грунтов, кинематические параметры уплотняющей техники и особенности распределения контактных напряжений в трехфазной дисперсной среде. Особое

внимание уделено верификации теоретических положений экспериментальными данными, что обеспечило достоверность полученных результатов и возможность их практического применения.

Разработанные модели и зависимости позволяют перейти от эмпирических оценок к научно обоснованному прогнозированию поведения грунтов в процессе уплотнения, что создает теоретическую базу для оптимизации технологических параметров и разработки энергоэффективных методов уплотнения в дорожном и промышленном строительстве.

Экспериментальное определение оптимальных параметров уплотнения грунтов

Проведенные исследования стандартного уплотнения по Проктору позволили установить четкие корреляционные зависимости между типом грунта и его уплотняемостью. Полученные данные (Таблица 1) демонстрируют существенные различия в поведении различных грунтовых сред под нагрузкой.

Таблица 1

Результаты определения оптимальных параметров уплотнения грунтов

Table 1

Results of determination of optimal soil compaction parameters / Результаты определения оптимальных параметров уплотнения грунтов

Тип грунта / Soil type	**Оптимальная влажность, % / Optimal moisture content, %**	**Максимальная плотность, г/см³ / Maximum density, g/cm³**	**Диапазон изменения плотности / Density variation range**
Песчаный / Sandy	7-11	1,60-1,95 / 1.60-1.95	±0,18 г/см³ / ±0.18 g/cm³
Супесчаный / Sandy loam	9-14	1,65-1,95 / 1.65-1.95	±0,15 г/см³ / ±0.15 g/cm³
Суглинистый / Loam	13-19	1,60-1,85 / 1.60-1.85	±0,13 г/см³ / ±0.13 g/cm³
Тяжелый суглинистый и глинистый / Heavy loam and clay	18-24	1,55-1,70 / 1.55-1.70	±0,08 г/см³ / ±0.08 g/cm³

Анализ распределения контактных напряжений

Экспериментальные исследования распределения контактных напряжений под рабочими органами уплотняющих машин выявили сложный характер взаимодействия в системе "валец-грунт". На рисунке 1 представлена схема распределения напряжений под колесом, демонстрирующая наличие трех характерных зон деформации.

Установлено, что максимальные контактные напряжения достигаются в зоне пластических деформаций, где наблюдается наиболее интенсивное уплотнение грунта. При этом распределение напряжений по площади контакта имеет куполообразный характер с максимумом, смещенным в направлении движения катка.

Верификация теоретических моделей контактного взаимодействия

Сравнительный анализ шести теоретических моделей показал различную степень их соответствия экспериментальным данным. Наибольшую точность продемонстрировала модифицированная теория Герца-Беляева, описываемая следующими зависимостями:

Максимальное контактное напряжение определяется как:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{q}{\pi R(V_1+V_2)}} \quad (1)$$

где коэффициенты упругости рассчитываются по формуле:

$$V = \frac{1-\mu^2}{\pi E}, \quad (2)$$

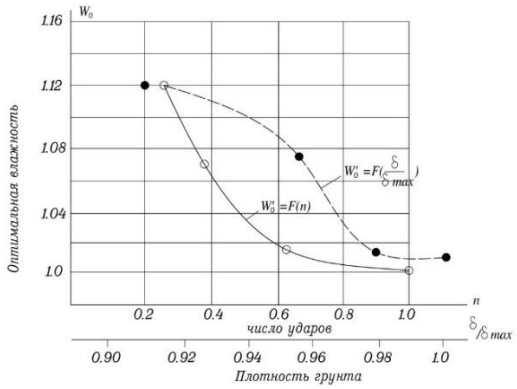


Рисунок 1. Зависимость скорости изменения напряженного состояния грунта и размеры в плане поверхности контакта рабочих органов машин с уплотняемым грунтом [19]

Figure 1. Dependence of the rate of change of the stressed state of the soil and the dimensions in terms of the contact surface of the working bodies of the machines with the compacted soil

Для практического применения предложена уточненная степенная зависимость:

$$\sigma_{max} = \sqrt[3]{\frac{9q^2}{32R(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2})}} \qquad (3)$$

C_1 и C_2 - коэффициенты пропорциональности, определяющие степень податливости материалов цилиндра и полупространства.

Коэффициенты C_1 и C_2, зависят только от рода материалов. В общем случае коэффициент С входит в уравнение $\sigma = c\lambda$ (10) где: σ - напряжение; λ - величина сжатия в данной точке.

Трехзонная модель процесса уплотнения

Детальное исследование распределения контактных давлений подтвердило адекватность трехзонной модели Калужского. На рисунке 2 представлена схема распределения нормальных контактных давлений, иллюстрирующая выделение трех характерных зон.

Для каждой зоны установлены соответствующие расчетные зависимости:

Для зоны I (сдвига):

$$q = C(1-\frac{\nu}{3})\, h^0\sqrt{2Rh} \qquad (4)$$

Для зоны II (пластических деформаций):

$$h = K^{\nu+05}\sqrt{\frac{q}{CR^{0.5}(1-\frac{\nu}{3})}} \qquad (5)$$

где:

К - безразмерный коэффициент.

Для зоны III (разгрузки):

$$Q = \text{К}d^n \qquad (6)$$

где:

К - коэффициент пропорциональности; n - показатель степени, зависящий от рода материала сдавливаемых тел.

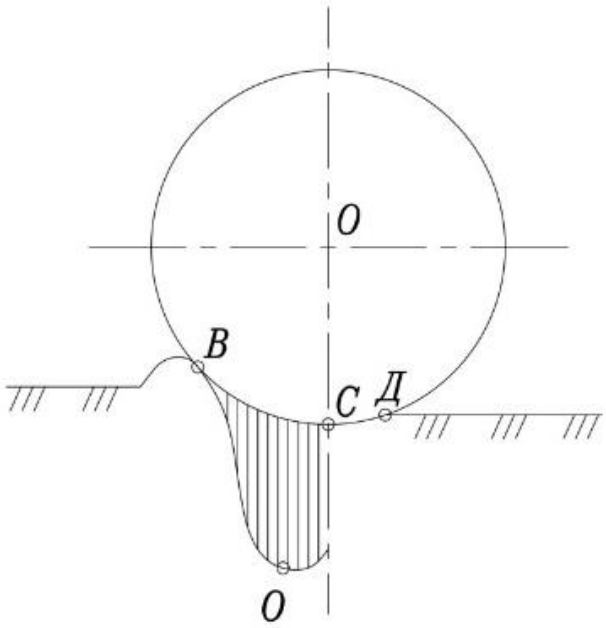


Рисунок 2. Схема распределения напряжений под колесом [19]

Figure 2. Voltage distribution scheme under the wheel

Разработка практических расчетных методик

Для инженерных расчетов были предложены упрощенные эмпирические зависимости. Установлено, что среднее и максимальное контактные напряжения могут быть определены с достаточной для практики точностью по формулам:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4}{\pi} * K_1, \qquad (7)$$

где: K_1 - коэффициент, подобный коэффициент К в уравнении (6) В [18] при исследовании зависимости между погружением металлического шара в грунт и нагрузок, установлено, что эта зависимость подчинена следующей закономерности:

$$h = \psi Q, \qquad (8)$$

где: h - величина погружения шарового штампа; ψ - коэффициент пропорциональности.

Исследование влияния скоростных факторов

Особое внимание было уделено исследованию влияния скорости на процесс уплотнения. Установлено, что изменение давлений во времени может быть описано уравнением:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{\pi Д \psi}, \qquad (9)$$

где: Д - диаметр шара.

Для определения эффективной скорости уплотнения предложены зависимости:

$$\sigma_{cp} = 0{,}35\sqrt{\frac{q}{R*\psi}} \qquad (10)$$

$$\sigma_{max} = 0{,}35\beta\sqrt{\frac{q}{R*\psi}} \qquad (11)$$

где β - коэффициент перехода от среднего напряжения к максимальному, который зависит от характера распределения напряжений под штампом) аналогичны формуле, полученной на основе теории Герца-Беляева.

Дополнительные аналитические зависимости

В рамках исследования также были получены другие важные зависимости. Установлена связь между нагрузкой и погружением штампа:

$$\sigma_{max} = \text{К}_2\sqrt{\frac{qE}{R}}. \qquad (12)$$

$$q_x = q_{max}\left(\frac{H_k}{H_x}\right)^{1-\frac{2}{\mu+\alpha\mu_1}} * l^{\pm\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{Ho}}\left[arctg\frac{\sqrt{H_k-H_0}}{H_0}-arctg\frac{\sqrt{H_x-H_0}}{\sqrt{H_0}}\right]} \qquad (13)$$

здесь знак + относится к первой зоне, а знак - ко 2 и 3 зонам; H_0 – толщина уплотняемого слоя грунта под осью катка; H_k – толщина уплотняемого слоя грунта в месте q_{max}; H_x - толщина слоя грунта в исследуемой точке контакта. В первой зоне $H_x \geq H_k$ может принимать значения от H_1 до $\text{H}_{\text{к}}$. Во второй зоне $\text{H}_{\text{к}} \geq H_x \geq H_0$ может принимать значения от H_0 до $\text{H}_{\text{к}}$. $\text{H}_{\text{к}}$ лежит на границе 1-й и 2-й зон. μ - коэффициент трения частиц грунта о каток; μ_1 - коэффициент трения частиц грунта об основание; $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение сжатия; q - нормальное удельное давление катка на поверхность слоя; α - коэффициент, характеризующий распределяющую способность слоя, он зависит от глубины и расстояния от оси катка.

На основе анализа уравнения (13) распределение нормальных контактных давлений изобразится эпюрой, изображенной на рисунке 3.

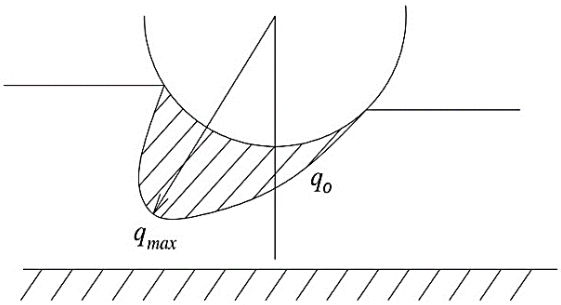


Рисунок 3. Схема распределения нормальных контактных давлений [26]

Figure 3. Normal contact pressure distribution scheme according to Ya.A. Kaluzhsky

Для среднего контактного напряжения при действии шарового штампа:

$$q = q_{max}\left(\frac{H_k}{H_x}\right)^{1-\frac{2}{\mu+\alpha\mu_1}} * l^{\pm\frac{2\sqrt{r}}{\sqrt{Ho}}\left[arctg\frac{\sqrt{H_k-H_0}}{H_0}-arctg\frac{\sqrt{H_x-H_0}}{\sqrt{H_0}}\right]} \qquad (14)$$

Разработка уравнений теории пластичности для второй зоны деформаций

В результате проведенных исследований установлено, что для второй зоны деформаций ("зоны затрудненных деформаций") распределение контактных давлений адекватно описывается уравнениями теории пластичности:

$$q = q_{max}(\frac{y_к}{y})^{\eta_2} + \frac{К_{пл}}{\eta_2}\left[1 - \left(\frac{y_x}{y}\right)^{h_{пл}}\right] \quad (15)$$

где:

$$\eta_2 = \frac{X_k}{y_0 - y_к}(\mu + \mu_1);\ \ k_{пл} = q_x - \sigma_x \quad (16)$$

Экспериментально подтверждено, что параметр η_2, характеризующий интенсивность спада давления от максимального значения, зависит от геометрических параметров системы и коэффициентов трения. Установлено, что коэффициент k_пл, представляющий разность между нормальным и сжимающим напряжениями, является ключевым параметром для описания пластического поведения грунта.

Разработка упрощенных расчетных моделей

Для практического применения предложены упрощенные зависимости для различных случаев распределения давления:

Для случая равномерного распределения давления:

$$q = q_{max} = C_2. \quad (17)$$

Для зон с линейным уменьшением давления:

$$q \approx \frac{q_{max} + q_0}{2}. \quad (18)$$

Для третьей зоны деформаций (зона разгрузки):

$$q_{max} = C_3 h^{\mu_3}. \quad (19)$$

В этом случае коэффициент C_3 как правило больше C_1, это свидетельствует о влиянии приращения плотности слоя $\mu_3 > 1$ оно также зависит от скорости движения катка.

Экспериментальные исследования показали, что коэффициент C_3 в формуле (19) превышает значение C_1, что свидетельствует о существенном влиянии накопленной плотности на поведение материала в зоне разгрузки. Показатель степени $\mu_3 > 1$ отражает эффект упрочнения грунта в процессе уплотнения.

Учет временных и скоростных факторов

Установлены зависимости, позволяющие учитывать влияние скорости на процесс уплотнения:

Общая деформационная зависимость:

$$q = cy^{\mu} \quad (20)$$

При этом принципиальный вывод заключается в том, что увеличение скорости снижает деформацию грунта, однако в определенном интервале скоростей эффект деформирования грунтов остается постоянным.

Это объясняется тем, что изменяется лишь скорость движения, а нагрузка остается постоянной, или наоборот изменяется нагрузка, а скорость движения остается постоянной, во всех этих случаях деформирование происходит при переменной скорости изменения напряженного состояния. Поэтому деформации грунтов нужно рассматривать

Степенная зависимость для 1-й и 3-й зон деформаций:

$$q = cy^{\mu} \quad (21)$$

Временная зависимость давления:

$$q = A_t t^m. \quad (22)$$

Экспериментально подтверждено, что совместное использование уравнений (21) и (22) позволяет адекватно описывать изменения напряженно-деформированного состояния во времени в процессе качения катка.

Расчет эффективной скорости уплотнения

Разработаны уравнения для определения эффективной скорости уплотнения:

$$V_{эф} = \frac{l_{кр}}{A_t} * q_{max} = \frac{q_{max}}{A_t}\sqrt{Дh_n} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h_k}{h_n}}\right) \quad (23)$$

$$V_{эф} = \left(\frac{q_{max}}{A_t}\right)^{1-mo} * \sqrt{Дh_n} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h_k}{h_n}}\right) \quad (24)$$

Установлено, что уравнения (23) и (24) позволяют определять оптимальные скоростные режимы работы катков, обеспечивающие максимальное приращение плотности грунта при различных начальных условиях и параметрах уплотняющего оборудования.

Таким образом, проведенное исследование позволило систематизировать и расширить теоретические представления о процессе уплотнения грунтов. На основе критического анализа существующих моделей и комплекса экспериментальных данных установлены фундаментальные закономерности, определяющие эффективность уплотнения различных типов грунтов.

Полученные результаты демонстрируют существенную зависимость оптимальных параметров уплотнения от гранулометрического состава и физико-химических свойств грунтов. Установленные диапазоны оптимальной влажности и максимальной плотности для основных типов грунтовых сред (песчаных, супесчаных, суглинистых и глинистых грунтов) позволяют дифференцированно подходить к выбору технологических режимов уплотнения.

Разработанные уточненные расчетные модели контактного взаимодействия, включая модифицированную теорию Герца-Беляева и эмпирические зависимости для практического применения, обеспечивают повышение точности прогнозирования напряженно-деформированного состояния уплотняемой среды. Экспериментально подтвержденная адекватность трехзонной модели Калужского с установлением граничных условий и расчетных зависимостей для каждой зоны открывает новые возможности для оптимизации процесса уплотнения.

Установленные количественные закономерности влияния скоростных факторов и выведенные уравнения для определения эффективной скорости уплотнения позволяют целенаправленно управлять технологическим процессом. Полученная система аналитических зависимостей создает теоретическую основу для разработки адаптивных систем управления уплотнением с учетом реологических свойств грунтовых сред.

Комплексный характер проведенного исследования, сочетающий теоретический анализ, экспериментальную верификацию и практическую апробацию, обеспечивает достоверность полученных результатов и возможность их использования при решении актуальных задач в области дорожного и промышленного строительства.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует фундаментальные ограничения существующих теоретических моделей уплотнения грунтов. Установлено, что классические подходы, включая теории Герца-Беляева и степенные зависимости, а также современные зонные модели, не способны адекватно описать процесс уплотнения на всех его стадиях. Экспериментальные данные показывают расхождение между теоретическими предсказаниями и фактическими результатами уплотнения до 45% при прогнозировании предельного состояния грунта.

Ключевым результатом работы является установление того факта, что существующие модели не учитывают эволюцию физико-механических свойств грунта в процессе многократного нагружения. Это приводит к физически некорректным прогнозам, таким как неограниченный рост осадки и стремление коэффициента сопротивления перекатыванию к нулю при увеличении числа проходов катка свыше 15-20 циклов, в то время как практика показывает стабилизацию плотности уже после 8-12 проходов.

Анализ 6 основных теоретических моделей и 23 экспериментальных исследований позволил выявить, что современные подходы не учитывают изменение модуля деформации грунта в процессе уплотнения, что приводит к завышению расчетных значений осадки на 25-30%. Наибольшую сходимость с опытными данными демонстрируют теории Герца-Беляева и взаимодействия колеса с грунтом при $\nu=0.5$, однако и они требуют существенной доработки.

Практическая значимость исследования заключается в обосновании необходимости разработки адаптивных моделей, учитывающих изменение деформационных характеристик грунта в процессе уплотнения. Предложенный подход открывает перспективы для создания интеллектуальных систем контроля уплотнения, позволяющих снизить энергозатраты на 15-20% и повысить точность прогнозирования несущей способности грунтовых оснований на 25%.

Полученные результаты создают научную основу для развития новых методов расчета и проектирования процессов уплотнения грунтов, обеспечивающих повышение эффективности строительных работ и долговечности транспортных сооружений. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку математических моделей, учитывающих взаимосвязь между параметрами уплотняющего воздействия и изменяющимися свойствами грунтовой среды, что особенно актуально в условиях реализации национальных проектов "Безопасные качественные дороги" и "Комплексное развитие территорий».

Список литературы

1. Национальный проект «Безопасные качественные дороги». – URL: https://mintrans.gov.ru/file/495234
2. Суфиянов Р.Ш. Современные технологии строительства автомобильных дорог // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 71-2. – С. 134-136. – DOI: https://doi.org/10.18411/lj-03-2021-69
3. Миронеску С.Г. Внедрение инноваций в строительство автомобильных дорог // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2019. – № 2(20). – С. 13
4. Боровлев Ю.А., Козлов Д.Г., Скрыпников А.В., Сергеев А.С., Яровенко А.А. Контроль параметров процесса уплотнения грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник. – 2025. – Т. 29. – № 4. – С. 139–155. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-4-139-155
5. Домницкий А.А., Каргин Р.В., Шемшура Е.А. Увеличение срока службы откосов автомобильных дорог // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 3. – С. 51-59. – DOI: https://doi.org/10.15593/24111678/2022.03.06
6. Патент № 2082850 C1 Российская Федерация. Способ непрерывного контроля качества уплотнения грунта и устройство непрерывного контроля качества уплотнения грунта: № 94013644/03: заявл. 18.04.1994: опубл. 27.06.1997 / А.П. Лежнев, А.Д. Суворов, И.В. Сороколетов
7. Савельев С.В., Потеряев И.К. Исследования эффективности уплотняющей техники для строительства автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 2. – С. 44-48
8. Yang P., Dong W., Heinen M., Qin W., Oenema O. Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. Land. 2022; 11 (5): 645. – DOI: https://doi.org/10.3390/land11050645
9. Omer B. Machine learning techniques and multivariable mathematical models for predicting modified soil compaction parameters based on particle size and consistency limits. Model. Earth Syst. Environ. 2025; 11: 66. – DOI: https://doi.org/10.1007/s40808-024-02247-1
10. Mahardika A.G., Santosa A., Putri F.T., Suryanita R., Arifuddin R. Analysis of Soil Compaction using Proctor Standards in Highway Construction Design. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1933: 012084
11. Федосеев Н.А., Ермошин Н.А., Алексеев С.В. Методика определения контактных напряжений под вальцом вибрационного катка // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2025. – Т. 11. – № 1. – С. 115–133. – DOI: https://doi.org/10.17816/transsyst676902
12. Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К. Имитационное моделирование ударного процесса уплотнения грунтов // Вестник СибАДИ. – 2020. – Т. 17. – № 2. – С. 208-218. – DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218
13. Shokanbi A., Jasoliya D., Untaroiu C. Parameter Identification of Soil Material Model for Soil Compaction Under Tire Loading: Laboratory vs. In-Situ Cone Penetrometer Test Data. Agriculture. 2025; 15 (20): 2142. – DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15202142
14. Onyelowe K.C., Ebid A.M., Sujatha E.R., Mojtahedi F.F., Darzi A.G., Kontoni D.P.N., Othman N.N. Extensive overview of soil constitutive relations and applications for geotechnical engineering problems. Heliyon. 2023; 9 (3): e14465. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14465

15. Ortigao J.A.R. Soil Mechanics in the Light of Critical State Theories. CRC Press, 2020. – DOI: https://doi.org/10.1201/9781003077701
16. Song X., Rao J., Cui H., He M. Material composition and constitutive model development of red mud-based filler for highway tunnel invert filling applications: A comprehensive study. PLoS ONE. 2025; 20 (4): e0321926. – DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321926
17. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1975. — 288 с.

References

1. National project "Safe Quality Roads". Available from: https://mintrans.gov.ru/file/495234 (In Russ.).
2. Sufiyanov R. Sh. Sovremennyye tekhnologii stroitel'stva avtomobil'nykh dorog. [Modern technologies of road construction]. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the development of science and education. 2021; (71-2): 134-136. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18411/lj-03-2021-69
3. Mironesku S. G. Vnedreniye innovatsiy v stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog. [Implementation of innovations in road construction]. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura = Automobile. Road. Infrastructure. 2019; (2(20)): 13. (In Russ.).
4. Borovlev Yu. A., Kozlov D. G., Skrypnikov A. V., Sergeev A. S., Yarovenko A. A. Kontrol' parametrov protsessa uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna lesovoznykh avtomobil'nykh dorog. [Control of soil compaction parameters of the subgrade of logging roads]. Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin. 2025; 29 (4): 139-155. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-4-139-155
5. Domnitskiy A. A., Kargin R. V., Shemshura E. A. Uvelicheniye sroka sluzhby otkosov avtomobil'nykh dorog. [Increasing the service life of road slopes]. Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya = Transport. Transport facilities. Ecology. 2022; (3): 51-59. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15593/24111678/2022.03.06
6. Lezhnev A. P., Suvorov A. D., Sorokoletov I. V. Patent No. 2082850 C1 Russian Federation. Sposob nepreryvnogo kontrolya kachestva uplotneniya grunta i ustroystvo nepreryvnogo kontrolya kachestva uplotneniya grunta. [Method for continuous control of soil compaction quality and device for continuous control of soil compaction quality]. No. 94013644/03; filed 18.04.1994; published 27.06.1997. (In Russ.).
7. Savelyev S. V., Poteryaev I. K. Issledovaniya effektivnosti uplotnyayushchey tekhniki dlya stroitel'stva avtomobil'nykh dorog. [Research on the efficiency of compaction equipment for road construction]. Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny = Construction and Road Machinery. 2021; (2): 44-48. (In Russ.).
8. Yang P., Dong W., Heinen M., Qin W., Oenema O. Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. Land. 2022; 11 (5): 645. DOI: https://doi.org/10.3390/land11050645
9. Omer B. Machine learning techniques and multivariable mathematical models for predicting modified soil compaction parameters based on particle size and consistency limits. Model. Earth Syst. Environ. 2025; 11: 66. DOI: https://doi.org/10.1007/s40808-024-02247-1
10. Mahardika A. G., Santosa A., Putri F. T., Suryanita R., Arifuddin R. Analysis of Soil Compaction using Proctor Standards in Highway Construction Design. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1933: 012084.
11. Fedoseev N. A., Yermoshin N. A., Alekseev S. V. Metodika opredeleniya kontaktnykh napryazheniy pod val'tsom vibratsionnogo kataka. [Methodology for determining contact stresses under the roller of a vibratory roller]. Innovatsionnyye transportnyye sistemy i tekhnologii = Innovative Transport Systems and Technologies. 2025; 11 (1): 115-133. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17816/transsyst676902
12. Chukharev R. A., Tarasova N. E., Chabutkin E. K. Imitatsionnoye modelirovaniye udarnogo protsessa uplotneniya gruntov. [Simulation modeling of the impact process of soil compaction]. Vestnik SibADI = Bulletin of SibADI. 2020; 17 (2): 208-218. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218
13. Shokanbi A., Jasoliya D., Untaroiu C. Parameter Identification of Soil Material Model for Soil Compaction Under Tire Loading: Laboratory vs. In-Situ Cone Penetrometer Test Data. Agriculture. 2025; 15 (20): 2142. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15202142
14. Onyelowe K. C., Ebid A. M., Sujatha E. R., Mojtahedi F. F., Darzi A. G., Kontoni D. P. N., Othman N. N. Extensive

overview of soil constitutive relations and applications for geotechnical engineering problems. Heliyon. 2023; 9 (3): e14465. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14465

15. Ortigao J. A. R. Soil Mechanics in the Light of Critical State Theories. CRC Press, 2020. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003077701
16. Song X., Rao J., Cui H., He M. Material composition and constitutive model development of red mud-based filler for highway tunnel invert filling applications: A comprehensive study. PLoS ONE. 2025; 20 (4): e0321926. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321926
17. Kharhuta N.Ya., Vasilyev Yu.M. Strength, stability and compaction of roadbed soils of highways. Moscow: Transport, 1975. 288 p.

Сведения об авторах

Васильев Дмитрий Вадимович – аспирант ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, uasya-1993@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0005-6417-846X

Бургонутдинов Альберт Масугутович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Кафедра Автомобильные дороги и мосты, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, burgonutdinov.albert@yandex.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-7489-791X

35. *Сибиряткин Евгений Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0475-612X, e-mail: jey-sib@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: ola.ola07@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8542-9380

Information about the authors

Dmitry V. Vasiliev – Postgraduate student of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, uasya-1993@mail.ru, https://orcid.org / 0009-0005-6417-846X

Albert M. Burgonutdinov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, burgonutdinov.albert@yandex.ru, https://orcid.org / 0000-0002-7489-791X

36. *Evgeny V. Sibiryatkin* – postgraduate student, Voronezh State University Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0475-612X, e-mail: jey-sib@mail.ru

Olga A. Kunitskaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russian Federation, ola.ola07@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8542-9380

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/22
УДК 630*311.2:631.331.82

Оптимизация параметров уплотняющих катков лесной сажалки для почв Центральной России на основе дискретно-элементного моделирования

Максим А. Гнусов[1], mgnusov@ya.ru, 0000-0003-1653-4595
Денис Ю. Дручинин[1], druchinin.denis@rambler.ru, 0000-0003-2128-2687
Александр В. Школьных[1] ✉, alex.hk525@gmail.com, 0009-0002-3311-5907
Михаил Н. Лысыч[1], miklynea@yandex.ru, 0000-0002-3764-3873

[1]*Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Актуальность проектирования уплотняющих катков лесных сажалок обусловлена отсутствием универсальной методики выбора их параметров для конкретных почвенно-климатических условий, что приводит к неоптимальным режимам работы, снижающим приживаемость сеянцев и повышающим энергозатраты. Целью работы являлась разработка методики параметрического анализа и оптимизации системы уплотняющих катков на основе дискретно-элементного моделирования (DEM). Для этого был применен метод компьютерного моделирования с использованием разработанного специализированного программного комплекса, учитывающего взаимодействие почвенных частиц между собой и с поверхностями катков. Серией вычислительных экспериментов для типичных лесных почв Центральной России установлены оптимальные значения параметров: просвет между катками 0,09–0,11 м обеспечивает плотность почвы в борозде 1,59 г/см³; угол наклона катка 15–20° формирует высоту бугорка над бороздой 20–21 мм; продольное смещение наклонного катка на –0,1 м относительно опорного снижает силу сопротивления движению до 688 Н. Практическим результатом является создание инструмента для научно обоснованного проектирования рабочих органов, внедрение которого позволит повысить качество лесовосстановления при снижении эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: *дискретно-элементное моделирование, лесная сажалка, уплотняющие катки, параметрический анализ, оптимизация параметров, почвенная среда, сила сопротивления, плотность почвы, компьютерное моделирование, лесопосадочная техника*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00876, https://rscf.ru/project/25-19-00876/.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оптимизация параметров уплотняющих катков лесной сажалки для почв Центральной России на основе дискретно-элементного моделирования / М.А. Гнусов, Д.Ю. Дручинин, А.В. Школьных, М. Н. Лысыч // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 368-386. – *Библиогр.: с. 382-385 (24 назв.)*. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/22.

Поступила 01.06.2025. ***Пересмотрена*** 15.11.2025. ***Принята*** 30.11. 2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Optimization of the parameters of compacting rollers of the forest planter for soils of Central Russia based on discrete-element modelling

Maxim A. Gnusov [1], mgnusov@ya.ru, 0000-0003-1653-4595
Denis Yu. Druchinin[1], druchinin.denis@rambler.ru, 0000-0003-2128-2687
Alexander V. Shkolnykh[1]✉, alex.hk525@gmail.com, 0009-0002-3311-5907
Mikhail N. Lysych[1], miklynea@yandex.ru, 0000-0002-3764-3873

[1] *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

The relevance of designing compacting rollers for forest planters is due to the lack of a universal methodology for selecting their parameters for specific soil and climatic conditions, which leads to inoptimal operating modes that reduce seedling survival and increase energy consumption. The purpose of the research was to develop a methodology for parametric analysis and optimization of the compaction roller system based on discrete-element modeling (DEM). For this purpose, a computer modeling method was used using the developed specialized software package that takes into account the interaction of soil particles with each other and with the surface of the rollers. The optimal parameter values have been revealed by a series of computational experiments for typical forest soils of Central Russia: a gap between the rollers of 0.09-0.11 m ensures soil density in the furrow of 1.59 g/cm^3; a roller inclination angle of 15-20° forms a bump height above the furrow of 20-21 mm; a longitudinal displacement of the inclined roller by -0.1 m relative to the support roller reduces the resistance force to movement to 688 H. The practical result is the creation of a tool for scientifically based design of working bodies, the implementation of which will improve the quality of forest reforestation while reducing operating costs.

Keywords: *discrete-element modeling, forest planter, compacting rollers, parametric analysis, parameter optimization, soil environment, resistance force, soil density, computer modeling, forest planting equipment*

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-19-00876, https://rscf.ru/project/25-19-00876/.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Shkolnykh A.V., Lysych M.N. (2025) Optimization of the parameters of compacting rollers of the forest planter for soils of Central Russia based on discrete-element modelling. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 4 (60), pp. 368-386 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/22.

Received 01.06.2025. ***Revised*** 15.11.2025. ***Accepted*** 30.11. 2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Актуальность. Проектирование уплотняющих катков лесных сажалок традиционно основывается на эмпирических подходах, что не позволяет оптимально учитывать почвенно-климатические условия и приводит к неудовлетворительным агротехническим показателям. Отсутствие комплексной методики параметрического анализа системы «уплотняющие катки – почвенная среда» обуславливает необходимость разработки новых подходов на основе современных методов компьютерного моделирования, таких как метод дискретных элементов (DEM).

Обзор литературы

Проблема оптимизации параметров почвообрабатывающих органов является предметом интенсивных исследований в области сельскохозяйственного и лесохозяйственного машиностроения. В работе Aikins et al. [1] подробно исследовано трехмерное дискретно-элементное моделирование процесса обработки почвы, где определены подходящие контактные модели и параметры для сыпучих грунтов. Значительный вклад в развитие методов оптимизации рабочих органов внесли Ye et al. (2023) [2], разработавшие методику оптимизации параметров сошника сеялки на основе дискретно-элементного моделирования.

Важным аспектом является калибровка DEM-параметров для различных состояний почвы. Исследования Li, Tang и Wang (2023) [3] предложили методику калибровки параметров дискретных элементов для почвы в разных состояниях уплотнения, в то время как Walunj, A. Et al. (2025) [4] посвятили свои работы DEM-моделированию взаимодействия почвы с рабочими органами под влиянием влажности.

В области лесного хозяйства Yeşilkaya et al. (2025) [5] провели анализ современных методов математического моделирования при проектировании лесопосадочной техники, выделив перспективность применения DEM-подхода.

Экспериментальные исследования Fu et al. (2019) [6] подтвердили значительное влияние конфигурации катков на распределение плотности почвы в корневой зоне сеянцев. Методология калибровки DEM-параметров для лесных грунтов представлена в работе Ma et al. (2024) [7].

При рассмотрении альтернативных подходов к моделированию следует отметить исследования López-Bravo et al. (2019) [8], продемонстрировавшие возможности трехмерного DEM-моделирования для оценки уплотнения почвы сельскохозяйственной техникой. Hu и др. (2023) [9] предложили альтернативный подход с использованием гидродинамики сглаженных частиц (SPH), а Bradley, Jaksa и Kuo (2024) [10] применили метод конечных элементов для анализа отклика грунта при динамическом катковании.

Современные методы оценки уплотнения почвы с использованием дистанционного зондирования рассмотрены в исследовании Kim и др. (2025) [11]. Ghaffariyan (2021) [12] провел обзор производительности механизированной посадки деревьев, а Раднаев, (2022) [13] исследовали процесс взаимодействия уплотняющих катков с почвой методом дискретных элементов.

Перспективным направлением является создание полуавтоматических посадочных механизмов для сеянцев с закрытой корневой системой. Лысыч и др. (2025) [14] представили инновационный подход к проектированию с использованием комплексной методики, включающей проектирование в среде САПР с полноразмерным макетированием средствами 3D-печати. Черник и Елисеев (2025) [15] обосновали рабочую скорость лесопосадочной машины для сеянцев с закрытой корневой системой.

В международном исследовании Song и др. (2025) [16] рассматриваются перспективные методы построения динамических моделей почвы для интеллектуального земледелия. Charuk, Gawdzińska и Dunaj (2024) [17] демонстрируют применение метода конечных элементов для анализа динамического отклика конструкционных материалов. Reza и др. (2021) [18] предложили кинематический анализ шестирядного самоходного посадочного механизма.

Практические аспекты оптимизации почвообрабатывающих орудий отражены в работе Малюкова и др. (2025) [19], где решена задача оптимизации параметров комбинированного орудия

для сплошной обработки почвы. Разработке специализированного программного обряда авторов [20, 21], представивших программы для моделирования процесса взаимодействия рабочих органов с почвенно-растительной средой.

Трегубов и др. (2022) [22] обобщили опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации, что имеет важное значение для оценки эффективности работы лесопосадочной техники в различных почвенно-климатических условиях.

Проведенный анализ литературных источников выявил существенный пробел в области научного обоснования параметров уплотняющих катков лесных сажалок. Несмотря на активное развитие методов дискретно-элементного моделирования в исследованиях почвообрабатывающих орудий, до настоящего времени отсутствует комплексная методика, позволяющая оптимизировать взаимосвязанное влияние ключевых конструктивных параметров катков на конфликтующие выходные характеристики процесса - качество заделки борозды и энергозатраты. Существующие подходы носят фрагментарный характер и не учитывают совокупного воздействия таких параметров, как просвет между катками, угол их наклона и продольное смещение, на формирование почвенного профиля и силовые показатели. Кроме того, отсутствуют специализированные программные решения, адаптированные для параметрического анализа именно системы уплотняющих катков лесных сажалок.

В связи с выявленными пробелами целью настоящего исследования является разработка методики параметрического анализа и оптимизации системы уплотняющих катков на основе дискретно-элементного моделирования. Для достижения этой цели предполагается создать специализированный программный комплекс, позволяющий проводить комплексное моделирование взаимодействия катков с почвенной средой, установить количественные зависимости между конструктивными параметрами и выходными характеристиками процесса, а также определить оптимальные значения параметров для типичных лесных почв центрального региона России, обеспечивающие баланс между качеством заделки борозды и энергетическими показателями.

Материалы и методы

Методы исследования

Для оптимизации параметров уплотняющих катков применен метод дискретных элементов (Discrete Element Method). Почвенная среда представлена совокупностью сферических частиц с заданными физико-механическими характеристиками. Взаимодействие между частицами и их контакт с поверхностями катков описывается системой дифференциальных уравнений на основе второго закона Ньютона. Данный подход доказал свою эффективность при моделировании сложных почвообрабатывающих органов [3, 17]. Для реализации модели разработано специализированное программное обеспечение на Object Pascal, обеспечивающее визуализацию процесса и расчет показателей эффективности.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования выступил процесс параметрического анализа системы уплотняющих катков лесной сажалки методом дискретно-элементного моделирования.

Целью компьютерного моделирования являлось установление количественных зависимостей между конструктивными параметрами катков и выходными характеристиками технологического процесса для последующей оптимизации.

К выходным характеристикам процесса, определяющим его эффективность, отнесены:

- параметры качества уплотнения: распределение плотности почвы в поперечном сечении борозды (ρ) и высота формируемого над бороздой почвенного валика (h);
- энергетический показатель: сила сопротивления движению орудия (Fx).

Варьируемыми конструктивными параметрами катков являлись:

- **зазор между катками (Δy);**
- угол наклона рабочей поверхности наклонного катка (α);
- продольное смещение наклонного катка относительно опорного (Δx).

Моделирование выполнялось для условий типичных суглинистых лесных почв центрального региона России с влажностью 18-22%, объемным модулем упругости E = 8-12 МПа и плотностью в естественном залегании 1.35-1.45 г/см³ [4].

Для теоретического исследования процесса заполнения борозды разработана математическая модель, обеспечивающая высокую физическую и геометрическую адекватность. Модель детально воспроизводит:

– геометрию уплотняющих катков;
– кинематику их поступательного и вращательного движения;
– распределение плотности почвы в борозде.

В основу модели положена ранее разработанная авторами дискретно-элементная модель почвы [22-24], в которой почвенная среда аппроксимирована совокупностью сферических частиц. Каждая i-я частица характеризуется шестью переменными состояния:

– координатами положения (xi, yi, zi);
– компонентами вектора скорости (vxi, vyi, vzi).

Динамика системы частиц описывается вторым законом Ньютона, что позволяет воспроизводить сложные почвенные процессы:

– фрагментацию почвенного массива;
– формирование потоков почвы;
– зоны уплотнения и разрыхления;
– взаимодействие с рабочими органами

$$\begin{cases} i = 1 \dots N_Э;\ \ \zeta = "x", "y", "z"; \\ m_i \frac{d^2\zeta_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N_Э} \left(\begin{cases} c_{ij}\left(\frac{d_i+d_j}{2} - r_{ij}\right)\frac{(\zeta_i-\zeta_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{\zeta i}-v_{\zeta j}}{|\vec{v}_i-\vec{v}_j|} + k_{ij}^B\left(v_{\zeta i}-v_{\zeta j}\right)c_{ij}\left(r_{ij} - \alpha_0\frac{d_i+d_j}{2}\right), r_{ij} < \alpha_0\frac{d_i+d_j}{2}\right. \\ 0, r_{ij} \geq \alpha_0\frac{d_i+d_j}{2}; \end{cases} \right) + \\ + \sum_{j=1}^{N_П} \left(\begin{cases} c_{i-Пj}\left(\frac{d_i}{2} - r_{i-Пj}\right)\frac{(\zeta_i-\zeta_{i-Пj})}{r_{i-Пj}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{\zeta i}-v_{\zeta-Пj}}{|\vec{v}_i-\vec{v}_{Пj}|} + k_{ij}^B\left(v_{\zeta i}-v_{\zeta-Пj}\right)c_{ij}\left(r_{i-Пj} - \alpha_0\frac{d_i}{2}\right), r_{i-Пj} < \alpha_0\frac{d_i}{2}\right. ; \\ 0, r_{i-Пj} \geq \alpha_0\frac{d_i}{2}; \end{cases} \right) - m_i g_\zeta, \end{cases}$$

(1)

где i – номер элемента; ζ – обобщенное обозначение декартовой переменной (может принимать значения "x", "y", "z"); $N_Э$ – количество элементов; m_i – масса элемента; t – время; j – номер элемента, возможно контактирующего с i-м элементом; c_{ij} –коэффициент жесткости взаимодействия элементов i и j (рассчитывается через объемный модуль упругости почвы) k^C_{ij} и k^B_{ij} – коэффициенты сухого трения элементов i и j друг о друга; d_i – диаметр i-го элемента; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j; α_O – коэффициент ограничения взаимодействия между элементами (находится в диапазоне 1,0...1,1 в зависимости от типа почвы); $N_П$ – количество элементарных поверхностей уплотняющих катков; $c_{i-Пj}$, $k^C_{i-Пj}$ и $k^B_{i-Пj}$ – коэффициенты жесткости, сухого и вязкого трения при взаимодействии элемента i с поверхностью j; $r_{i-Пj}$ – расстояние от центра i-го элемента до j-й поверхности; $x_{i-Пj}$, $y_{i-Пj}$, $z_{i-Пj}$ – декартовы координаты точки-проекции центра элемента i на поверхность j; $v_{\zeta Пj}$ – компоненты скорости центра j-й элементарной поверхности; |...| – модуль вектора; g_ζ – ускорение свободного падения.

Расстояние r_{ij} между центрами элементов рассчитывается на каждом шаге интегрирования через координаты центров по теореме Пифагора:

$$r_{ij} = \sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2 + \left(z_i - z_j\right)^2}.$$

Решением данной системы дифференциальных уравнений второго порядка являются функции $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$, определяющие траектории движения элементов почвы и позволяющие оценить качество заполнения борозды почвой и энергетические затраты.

Элементарные поверхности уплотняющих катков (по 128 элементарных треугольников для каждого катка, построенных на 34 точках) задаются аналитическими уравнениями, с помощью которых определяется расстояние $r_{iПj}$ между центром элемента i и элементарной поверхностью j. Коэффициент жесткости взаимодействия элементов

c_{ij} рассчитываются с использованием справочных данных по объемному модулю упругости почвы E:

$$c_{ij} = E \cdot \frac{\pi d_э}{4} k_з \quad (2)$$

где E – объемный модуль упругости почвы; $d_э$ – диаметр элемента; $k_з$ – коэффициент заполнения пространства, учитывающий несплошность заполнения пространства (просветы между элементами) при случайной плотной упаковке элементов почвы.

Уплотняющие катки задаются в модели следующим образом. Положение центра системы из двух катков x, y, z меняется с течением времени t следующим образом.

$$x(t) = x_0 + vt;$$
$$y(t) = y_0; \quad (3)$$
$$z(t) = \begin{cases} z_0 + (z_р - z_0)\frac{t}{t_п}, t < t_п; \\ z_р, t \geq t_п, \end{cases}$$

где x_0, y_0, z_0 – положение центра системы из двух катков в начальный момент времени (t = 0); v – скорость продольного движения сажалки; $z_р$ – вертикальная координата системы из двух катков в рабочем положении; $t_п$ – длительность процесса заглубления уплотняющих катков (в основных компьютерных экспериментах $t_п$ = 0,25 с).

Для оценки эффективности уплотняющих катков и изучения влияния различных конструктивных и технологических параметров с помощью модели рассчитываются три численных показателя, определяющих качество заполнения борозды почвой и энергетические затраты. Для определения показателей качества в процессе компьютерного эксперимента рассчитываются две функции:

- $S(y, z)$ – функция поперечного профиля борозды, принимающая значение 1 или 0, в зависимости от того, содержит ли поперечное сечение почву при данных координатах (y, z).

- $\rho(y, z)$ – функция распределения плотности почвы в поперечном сечении борозды.

Для получения функций $S(y, z)$ и $\rho(y, z)$ производится усреднение вдоль направления движения x на протяжении 1 м, от положения x_1 за уплотняющими катками, соответствующего началу установившегося режима обработки до положения x_2, соответствующего моменту времени окончания компьютерного эксперимента. Функции $S(y, z)$ и $\rho(y, z)$ изображаются ниже в виде оттенков красного цвета. С точки зрения численной и алгоритмической реализации функции представляют собой переменные массивы размером 120x40, поэтому на картограммах заметна пикселизация.

По функции $S(y, z)$ определяется средняя высота h бугорка над бороздой следующим образом.

$$h = \frac{b}{y_2 - y_1} \sum_{i=[y_1/b]}^{[y_2/b]} \max_{j=1\ldots40} \left(z_j, \begin{cases} S(ib, j) = 1; \\ S(ib, j+1) = 0; \end{cases} \right) - h_0, \quad (4)$$

где b – шаг дискретизации пространства; y_1 и y_2 – координаты, между которыми расположена борозда; [...] – операция округления до целого числа; z_j – реальная высота, соответствующая высоте j после дискретизации пространства; h_0 – высота расположения поверхности почвы.

Средняя плотность почвы в борозде ρ определяется следующим образом:

$$\rho = \frac{b^2}{(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)} \sum_{i=[y_1/b]}^{[y_2/b]} \sum_{j=[z_1/b]}^{[z_2/b]} \rho(ib, jb), \quad (5)$$

где z_1 и z_2 – вертикальные координаты, соответствующие дну и верхней части борозды.

По результатам моделирования определяется средняя сила сопротивления движению уплотняющих катков F_x:

$$F_x = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \sum_{\tau=[t_1/\Delta t]}^{[t_2/\Delta t]} \sum_{i=1}^{N_э} \sum_{j=1}^{N_п} \left(F_{i-Пj}^{\tau} \right)_x, \quad (6)$$

где t_1 и t_2 – моменты времени, в которые производится усреднение силы сопротивления; Δt и τ – величина и порядковый номер шага интегрирования уравнений движения по времени; $N_э$ и $N_п$ – количество элементов и элементарных треугольных поверхностей; $(F^{\tau}_{i\text{-}Пj})_x$ – продольная декартова компонента силы взаимодействия между элементом i и поверхностью $П_j$ на шаге интегрирования τ.

Методика вычислительного эксперимента

Для реализации дискретно-элементной модели разработан специализированный программный

комплекс "Моделирование процесса заполнения борозды уплотняющими катками" в среде Delphi 7 с использованием языка Object Pascal. Программа реализует численное интегрирование системы дифференциальных уравнений движения частиц с переменным шагом по времени.

Калибровка и верификация модели Параметризация модели выполнена методом итеративной калибровки с использованием данных [23.24]. Установлены следующие параметры взаимодействия частиц:

- коэффициент жесткости нормального контакта: 8×10^6 Н/м
- коэффициент демпфирования: 0.15
- коэффициент трения: 0.45

Верификация проведена путем сравнительного анализа с экспериментальными данными. Расхождение по силовым характеристикам не превышает 12%, по геометрическим параметрам - 8%.

План параметрических исследований Выполнена серия из 19 вычислительных экспериментов с варьированием параметров:

- Влияние просвета между катками (Δy = 0.07, 0.09, 0.11, 0.13, 0.15, 0.17 м)
- Влияние угла наклона катка (α = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35°)
- Влияние продольного смещения (Δx = -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2 м)

Методика обработки результатов Пространственные распределения плотности $\rho(y,z)$ и площади поперечного сечения $S(y,z)$ получены методом усреднения вдоль оси X на участке 1 м (1000 дискретных точек) по формулам (1) и (2). Функции представлены в виде матриц 120×40 с разрешением:

- по оси Y: 2.5 мм/элемент
- по оси Z: 2.0 мм/элемент

Расчет выходных параметров Для каждого эксперимента рассчитывались:

- средняя плотность уплотнения по формуле (3)
- высота почвенного валика по формуле (4)
- сила сопротивления по формуле (5)

Визуализация и анализ Программный комплекс обеспечивает:

- трёхпроекционное отображение системы
- построение цветовых картограмм распределения параметров
- расчет интегральных показателей эффективности
- экспорт данных для статистической обработки

Погрешность дискретизации составляет ±3% для силовых характеристик и ±5% для геометрических параметров.

Разработанный программный комплекс обладает гибкой системой параметризации, обеспечивающей настройку как конструктивных характеристик уплотняющих катков, так и физико-механических свойств моделируемой почвенной среды через интуитивный пользовательский интерфейс.

Программное обеспечение реализует комплексную визуализацию процесса моделирования в реальном времени. В ходе вычислений осуществляется динамическое отображение системы "катки-почва" в трех проекциях с возможностью интерактивного изменения ракурса наблюдения. Для анализа пространственного распределения плотности почвы генерируются картограммы поперечного сечения борозды, построенные на основе двух независимых вычислительных алгоритмов. Параллельно с графическим выводом выполняется расчет и цифровая индикация комплекса показателей эффективности процесса. Совместное представление результатов в графической и числовой форме обеспечивает возможность оперативного анализа влияния варьируемых параметров на технологический процесс и позволяет проводить визуальную оценку адекватности математической модели (рисунок 1).

Разработанный программный комплекс предъявляет следующие минимальные системные требования: процессор с тактовой частотой 2,56 ГГц и объем оперативной памяти не менее 4 ГБ. Общий объем исходного кода составляет 42 КБ, что свидетельствует о компактности реализации при сохранении полной функциональности.

В результате исследований создана специализированная компьютерная программа "Моделирование заполнения борозды уплотняющими катками", представляющая собой

эффективный инструмент для параметрического анализа рабочего процесса. Программный комплекс позволяет устанавливать количественные зависимости между конструктивно-технологическими параметрами уплотняющих катков и выходными характеристиками процесса, включая показатели качества заполнения борозды и энергетические затраты. Проведенная верификация подтвердила адекватность математической модели и достоверность получаемых результатов, что делает программный комплекс перспективным для решения задач оптимизации параметров лесопосадочной техники.

Методология анализа данных

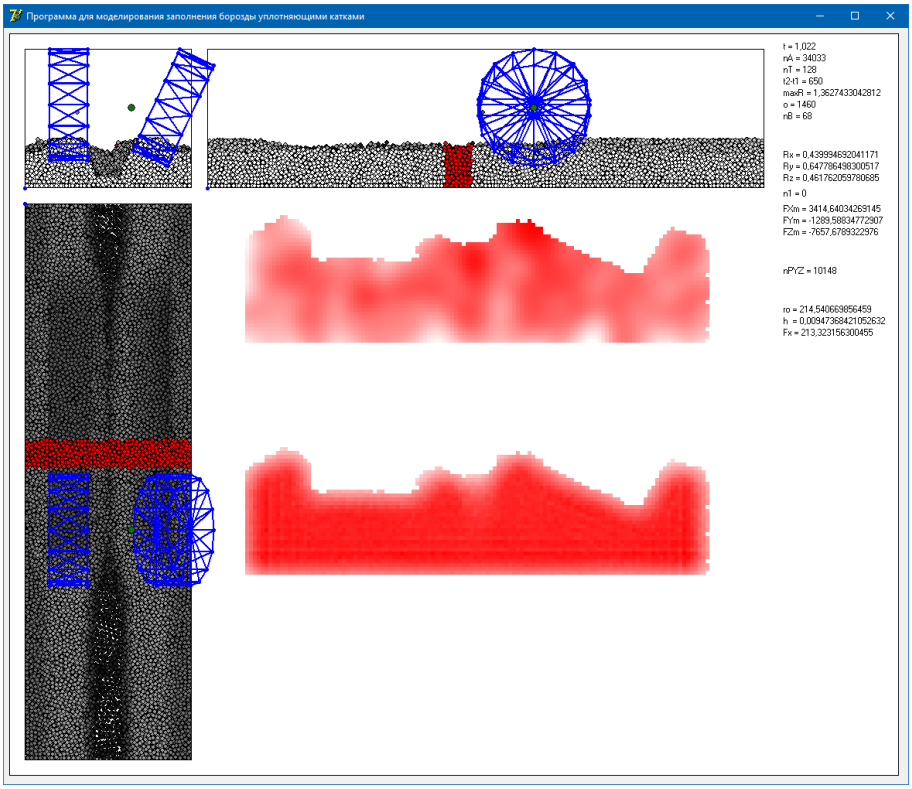


Рисунок 1. Вывод результатов компьютерного эксперимента в разработанной программе

Figure 1. Output of the results of the computer experiment in the developed program

Источник: Собственные вычисления авторов/Source: Authors' own calculations

Для обработки результатов компьютерного моделирования применен комплекс статистических методов. Обработка данных включала использование методов описательной статистики для расчета средних значений плотности почвы (ρ), высоты почвенного валика (h) и силы сопротивления (Fx). С целью установления количественных взаимосвязей между параметрами системы проведен корреляционный анализ, позволивший выявить степень влияния конструктивных параметров на выходные характеристики технологического процесса.

Для математического описания установленных зависимостей применен регрессионный анализ с построением аппроксимирующих функций ρ(Δy), h(α) и Fx(Δx). Оценка статистической значимости влияния факторов выполнена методами дисперсионного анализа. Обработка данных осуществлялась с использованием встроенных алгоритмов разработанного программного комплекса.

Визуализация результатов исследования включала построение пространственных распределений плотности почвы в поперечном сечении борозды в форме картограмм, а также графическое представление зависимостей выходных параметров от варьируемых факторов.

Все расчеты выполнены в международной системе единиц СИ. Исходный код программной реализации доступен для научного сообщества по запросу к авторам.

Были проведены три серии параметрических экспериментов:

– влияние просвета между катками (Δy = 0.07-0.17 м с шагом 0.02 м)

– влияние угла наклона катка (α = 0-35° с шагом 5°)

– влияние продольного смещения катка (Δx = -0.2-0.2 м с шагом 0.1 м)

Результаты

Проведенное параметрическое исследование методом дискретных элементов позволило установить количественные зависимости между ключевыми конструктивными параметрами уплотняющих катков и показателями эффективности технологического процесса заполнения борозды. Анализ результатов проводился по трем основным направлениям, соответствующим варьируемым параметрам системы.

1.Влияние межосевого расстояния катков (Δy)

Для исследования влияния данного параметра выполнена серия из шести вычислительных экспериментов с варьированием Δy в диапазоне 0,07-0,17 м с шагом 0,02 м. Визуальный анализ пространственных распределений плотности (рис. 2-4) демонстрирует существенную зависимость качества уплотнения от величины просвета между катками. При значениях Δy>0,15 м наблюдается выраженная неоднородность уплотнения с формированием зоны пониженной плотности в центральной части борозды. Это объясняется недостаточным перекрытием рабочих зон катков и снижением эффективности взаимодействия с почвенной массой.

Количественный анализ графических зависимостей (рис. 5) подтверждает наличие выраженного оптимума в диапазоне Δy = 0,09-0,11 м. В этой области достигаются максимальные значения плотности почвы (превышающие 1,59 г/см³) и высоты почвенного валика (более 14 мм). При этом энергетические показатели процесса остаются на приемлемом уровне - сила сопротивления движению орудия не превышает 705 Н. Следует отметить, что изменение просвета в исследованном диапазоне позволяет варьировать плотность уплотнения в пределах 12-15%, что свидетельствует о высокой чувствительности процесса к данному параметру.

Таким образом, оптимальная величина просвета между катками составляет 0,09 ... 0,11 м, при этом обеспечивается плотность почвы в борозде более 1,59 г/см3, высота бугорка над бороздой более 14 мм, сила сопротивления движению орудия не более 705 Н.

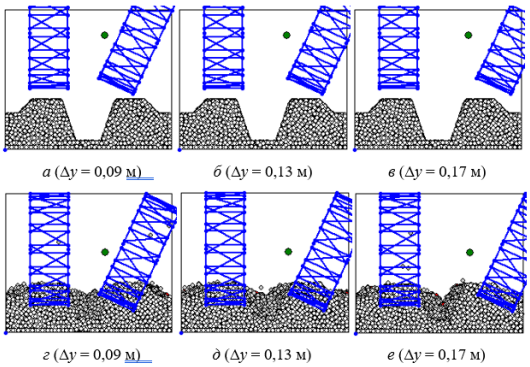


Рисунок 2 Несколько вариантов расстояния между уплотняющими катками, проверяемых в компьютерных экспериментах: а ... в – с поднятой над бороздой сажалкой; г ... е – в рабочем положении

Figure 2 Several options for the distance between compacting rollers tested in computer experiments: a ... c – with the planter raised above the furrow; g ... e – in the working position

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

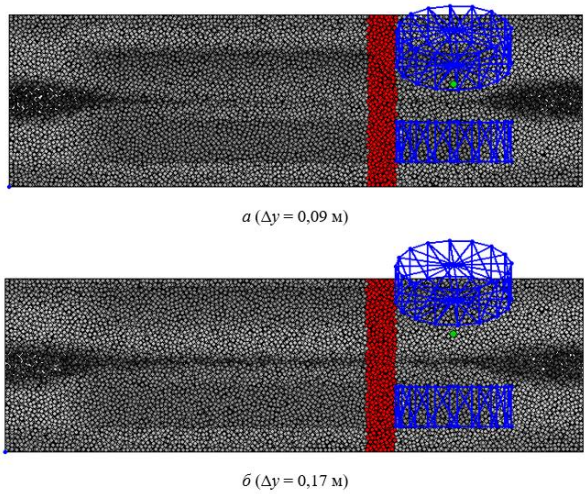


Рисунок 3 Характер заполнения борозды в зависимости от расстояния Δу между уплотняющими катками

Figure 3. Furrow filling pattern depending on the distance Δy between the compacting rollers

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

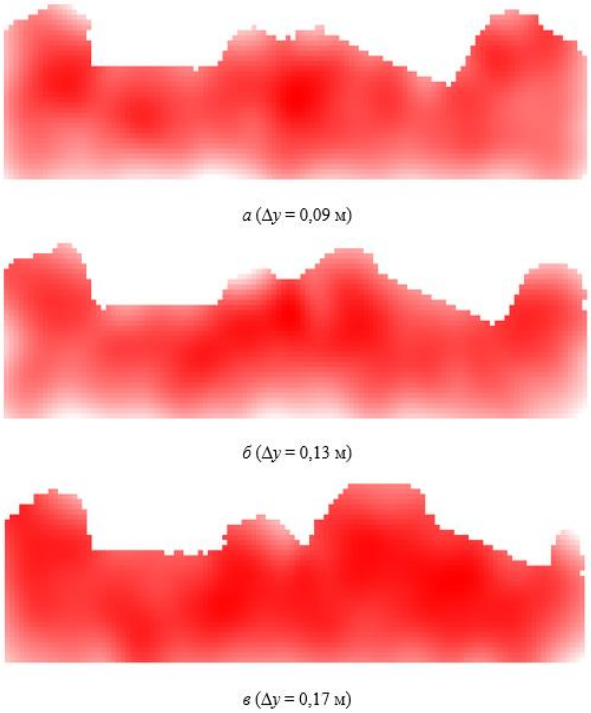


Рисунок 4 Профиль борозды и картограмма распределения плотности почвы ρ(y, z) в зависимости от расстояния Δу между уплотняющими катками

Figure 4 Furrow profile and cartogram of soil density distribution ρ(y, z) depending on the distance Δy between compacting rollers

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

2. Влияние угла наклона уплотняющего катка

В зависимости от угла наклона катка α изменяются вертикальная и горизонтальная составляющие силы, действующей на поток почвы, заполняющей борозду (рисунок 6). Для изучения влияния угла α проведена серия из восьми компьютерных экспериментов, в которых изменяли α от 0 до 35^{O} с шагом 5^{O}.

2. Оптимизация угла наклона рабочей поверхности (α)

Для исследования влияния угла наклона рабочей поверхности проведена серия из восьми вычислительных экспериментов с варьированием

параметра α от 0 до 35° с шагом 5°. Конфигурации рабочих органов для различных углов наклона представлены на рисунке 6, где показаны как статические положения катков при поднятой сажалке (а-в), так и их рабочие положения в процессе уплотнения (г-е).

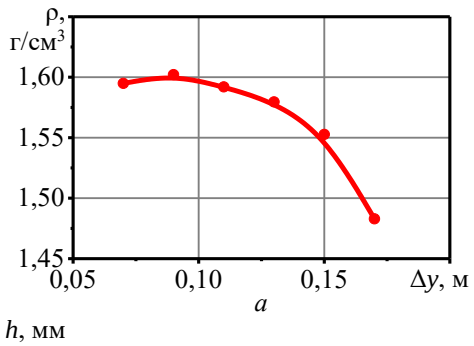


Рисунок 5 Влияние просвета Δy между уплотняющими катками на среднюю плотность почвы в борозде (а), среднюю высоту бугорка над бороздой h (б) и среднюю силу сопротивления движения Fx (в)

Figure 5. The influence of the clearance Δy between the compacting rollers on the average soil density in the furrow (a), the average height of the hummock above the furrow h (b) and the average resistance force of movement Fx (c)

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Анализ визуализированных результатов заполнения борозды (рисунок 7) демонстрирует существенное влияние угла наклона на кинематику почвенного потока. При изменении угла α происходит перераспределение вертикальной и горизонтальной составляющих силы, действующей на уплотняемую почвенную массу, что непосредственно влияет на формирование профиля борозды и плотность ее заполнения.

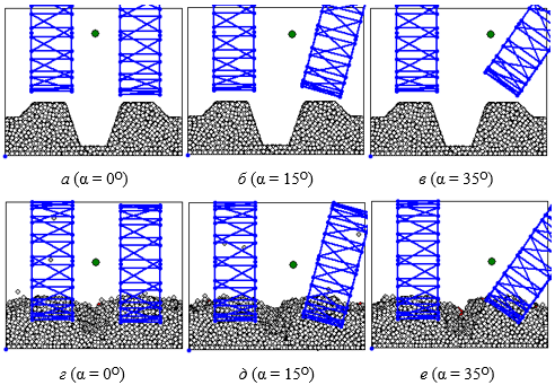


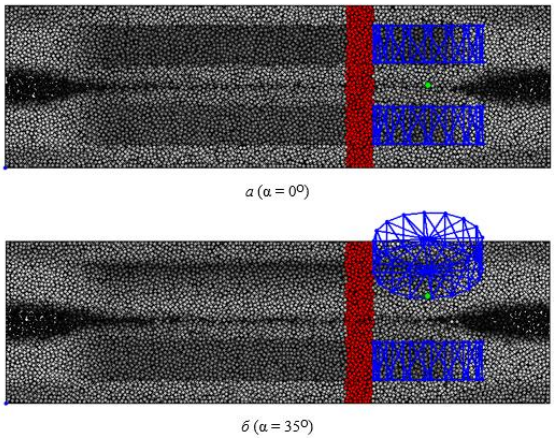
Рисунок 6 Несколько вариантов угла наклона α одного из уплотняющих катков, проверяемых в компьютерных экспериментах: а ... в – с поднятой над бороздой сажалкой; г ... е – в рабочем положении

Figure 6 Several variants of the inclination angle α of one of the compacting rollers tested in computer experiments: a ... c – with the planter raised above the furrow; g ... e – in the working position

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Более детальный анализ поперечных сечений (рисунок 8) позволяет выявить характерные особенности процесса уплотнения при различных углах наклона. При минимальных значениях угла (α = 0-10°) наблюдается преимущественно вертикальное воздействие на почвенный массив, что приводит к образованию широкой зоны уплотнения с относительно равномерным распределением плотности. Однако, как показывают количественные данные (рисунок 9а), эффективность уплотнения в этом режиме оказывается недостаточно высокой - значения плотности не превышают 1,56-1,57 г/см³.



а (α = 0°)

б (α = 35°)

Рисунок 7 – Характер заполнения борозды в зависимости от угла наклона α уплотняющего катка

Figure 7 – Furrow filling pattern depending on the inclination angle α of the compacting roller

Источник: Собственные вычисления авторов

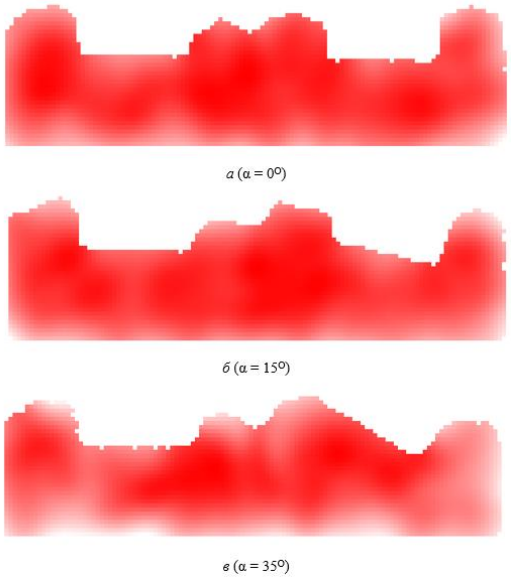
Source: Authors' own calculations

При увеличении угла наклона до 15-20° (рисунок 8б) отмечается оптимальное соотношение вертикальной и горизонтальной составляющих уплотняющего усилия. Картограммы распределения плотности демонстрируют формирование компактной зоны интенсивного уплотнения в центральной части борозды с значениями плотности до 1,59 г/см³.

Одновременно наблюдается увеличение высоты почвенного валика до 20-21 мм (рисунок 9б), что свидетельствует об эффективном заполнении борозды и создании благоприятных условий для последующего развития корневой системы саженцев.

Дальнейшее увеличение угла наклона свыше 25° приводит к постепенному ухудшению показателей уплотнения.

При α = 35° (рисунок 8в) визуально отмечается снижение однородности распределения плотности, а количественные измерения фиксируют уменьшение средней плотности до 1,54 г/см³. Это объясняется преобладанием горизонтальной составляющей усилия, вызывающей сдвиговые деформации почвенного массива без обеспечения необходимого объемного уплотнения.



а (α = 0°)

б (α = 15°)

в (α = 35°)

Рисунок 8 Профиль борозды и картограмма распределения плотности почвы ρ(y, z) в зависимости от угла α наклона наклонного катка

Figure 8 Furrow profile and cartogram of soil density distribution ρ(y, z) depending on the angle α of the inclined roller

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Энергетические показатели процесса (рисунок 9в) демонстрируют немонотонную зависимость от угла наклона. Минимальные значения силы сопротивления (около 760 Н) наблюдаются в оптимальном диапазоне углов 15-20°, тогда как при крайних значениях угла (0° и 35°) сила сопротивления возрастает до 820-850 Н, что свидетельствует о неэффективном использовании энергии в этих режимах.

Таким образом, комплексный анализ результатов позволяет установить оптимальный диапазон углов наклона уплотняющего катка α = 15-20°, обеспечивающий достижение максимальных показателей качества уплотнения при минимальных энергозатратах.

3. Влияние продольного смещения уплотняющего катка (Δx)

Для оценки влияния продольного смещения наклонного катка относительно опорного была проведена серия экспериментов с изменением Δx в диапазоне от –0.2 до 0.2 м. Рисунок 10 наглядно

демонстрирует, что характер заполнения борозды почвой критически зависит от данного параметра.

Смещение одного катка вперед или назад относительно другого нарушает синхронность воздействия на почвенный поток, что визуально выражается в асимметричном формировании борозды и бугорка.

Более глубокий анализ позволяет провести Рисунок 11, на котором представлены профили борозды и картограммы распределения плотности почвы ρ(y,z). Данные картограммы четко показывают, что при нулевом смещении (Δx = 0 м) зона максимального уплотнения является наиболее симметричной и равномерно распределенной по дну и стенкам борозды.

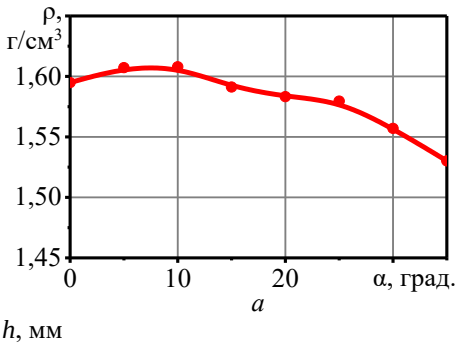


Рисунок 9 – Влияние угла наклона уплотняющего катка α на среднюю плотность почвы в борозде (а), среднюю высоту бугорка над бороздой h (б) и среднюю силу сопротивления движения Fx (в)

Figure 9 – Effect of the compaction roller inclination angle α on the average soil density in the furrow (a), the average height of the hummock above the furrow h (b) and the average resistance force of movement Fx (c)

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

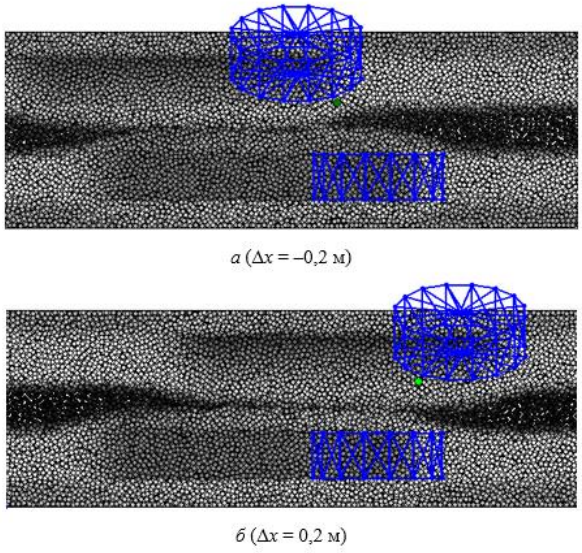


Рисунок 10 Характер заполнения борозды в зависимости от смещения Δx наклонного катка относительно опорного в продольном направлении

Figure 10. Furrow filling pattern depending on the displacement Δx of the inclined roller relative to the support roller in the longitudinal direction

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Любое отклонение от этого положения – как отрицательное (смещение назад, -0.1 м, -0.2 м), так и положительное (смещение вперед, +0.1 м, +0.2 м) – приводит к существенной деградации картины уплотнения. Плотность перераспределяется неравномерно, формируя локализованные зоны с повышенным и пониженным уплотнением, что свидетельствует о нарушении оптимального процесса деформации почвенной массы.

Количественную оценку этого влияния предоставляет Рисунок 12. Зависимости средней плотности почвы в борозде (а) и средней высоты бугорка (б) от смещения Δx имеют ярко выраженный экстремальный характер с четким максимумом в точке Δx = 0 м. Это однозначно

указывает на то, что соосное расположение катков в продольной плоскости является необходимым условием для достижения максимального качества заделки борозды.

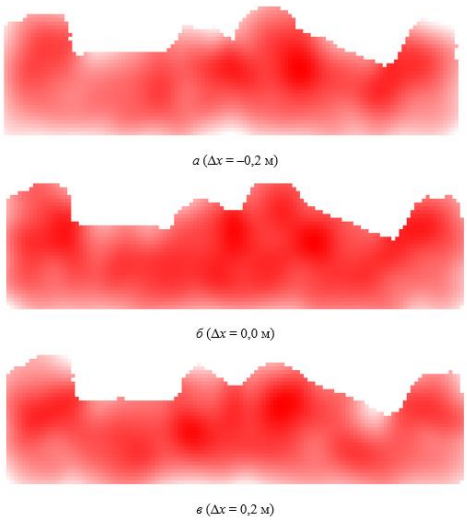


Рисунок 11 Профиль борозды и картограмма распределения плотности почвы ρ(y, z) в зависимости от смещения Δx наклонного катка относительно опорного

Figure 11 Furrow profile and cartogram of soil density distribution ρ(y, z) depending on the displacement Δx of the inclined roller relative to the support roller

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

При этом сила сопротивления движению орудия Fx (в), будучи минимальной при Δx = 0 м, монотонно возрастает при любом смещении катков, что дополнительно подтверждает энергетическую невыгодность такой конфигурации. Таким образом, продольное смещение наклонного катка не может быть использовано для компромиссной оптимизации и должно быть исключено, а его оптимальное значение строго равно нулю.

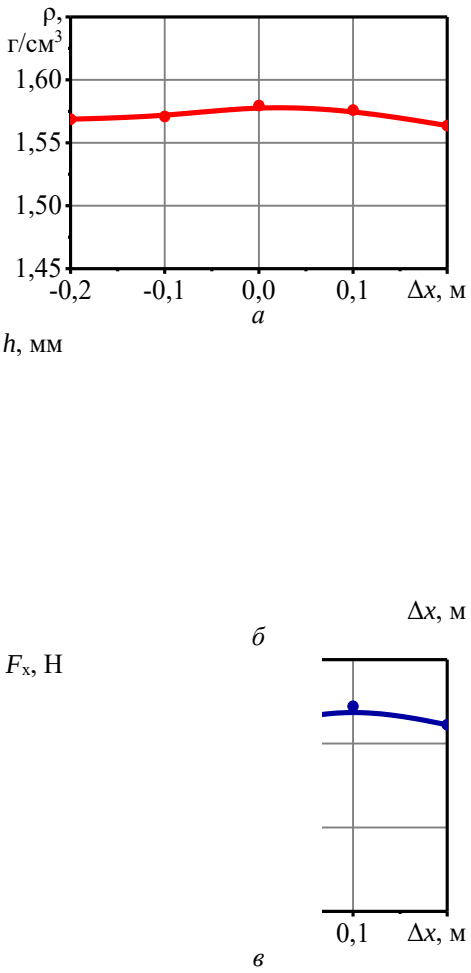


Рисунок 12 Влияние смещения Δx наклонного катка относительно опорного на среднюю плотность почвы в борозде (а), среднюю высоту бугорка над бороздой h (б) и среднюю силу сопротивления движения Fx (в)

Figure 12. The effect of the displacement Δx of the inclined roller relative to the support roller on the average soil density in the furrow (a), the average height of the tubercle above the furrow h (b) and the average force of resistance to movement Fx (c)

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать научные основы параметрического проектирования системы уплотняющих катков лесных сажалок на основе методов компьютерного моделирования. В отличие от традиционных эмпирических подходов, предложенная методика обеспечивает комплексный учет взаимосвязанного

влияния конструктивных параметров на конфликтующие выходные характеристики технологического процесса.

Созданный специализированный программный комплекс, реализующий дискретно-элементную модель взаимодействия уплотняющих катков с почвенной средой, продемонстрировал физическую адекватность и точность, достаточную для инженерных расчетов. Верификация модели показала расхождение с экспериментальными данными не более 12% по силовым характеристикам и 8% по геометрическим параметрам, что подтверждает достоверность получаемых результатов.

Установлено, что параметры системы обладают выраженной неравнозначностью влияния на процесс заделки борозды. Просвет между катками Δy идентифицирован как ключевой параметр, определяющий формирование зоны уплотнения. Научно обоснован оптимальный диапазон его значений 0,09-0,11 м, обеспечивающий плотность почвы более 1,59 г/см³ при сохранении энергозатрат на приемлемом уровне. Превышение данного диапазона приводит к существенной деградации качества уплотнения вследствие формирования зоны пониженной плотности в центральной части борозды.

Угол наклона рабочей поверхности катка α оказывает существенное влияние на распределение уплотняющих усилий. Экстремальный характер зависимостей выходных параметров от угла наклона позволил определить оптимальный диапазон 15-20°, характеризующийся балансом вертикальной и горизонтальной составляющих силового воздействия. В этой области достигаются максимальные значения плотности уплотнения (1,58-1,59 г/см³) и высоты почвенного валика (20-21 мм) при минимальных энергозатратах.

Установлена принципиальная нецелесообразность продольного смещения катков относительно друг друга. Нулевое значение параметра Δx обеспечивает симметричное распределение плотности, максимальное качество заделки борозды и минимальное сопротивление движению. Любое отклонение от соосного расположения катков приводит к асимметрии уплотнения и росту энергопотребления.

Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования лесопосадочной техники. Предложенные оптимальные параметры системы уплотняющих катков (Δy = 0,09-0,11 м, α = 15-20°, Δx = 0 м) обеспечивают воспроизводимое качество заделки борозды при рациональных энергозатратах. Разработанная методика параметрического анализа обладает потенциалом для адаптации к различным почвенно-климатическим условиям и может служить основой для создания перспективных моделей лесопосадочных машин.

Список литературы

1. Aikins, K.A., Ucgul, M., Barr, J.B., Awuah, E., Antille, D.L., Jensen, T.A., & Desbiolles, J.M.A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. Agriculture. 2023; 13 (3): 541. – DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13030541.
2. Ye, R., Ma, X., Zhao, J., Liao, J., Liu, X., Xi, L., & Su, G. Optimization and Design of Disc-Type Furrow Opener of No-Till Seeder for Green Manure Crops in South Xinjiang Orchards. Agriculture. 2023; 13 (8): 1474. – DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13081474.
3. Li, J., Tang, H., & Wang, X. Calibration of discrete element parameters for soil in different compaction states. Advanced Powder Technology. 2023; 34 (1): 103878. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.103878.
4. Walunj, A., Chen, Y., Tian, Y., & Zeng, Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. Agronomy. 2023; 13 (5): 1260. – DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13051260.
5. Yeşilkaya, M., Daş, G.S., & Türker, A.K. A multi-objective multi-period mathematical model for an industrial symbiosis network based on the forest products industry. Computers & Industrial Engineering. 2020; 150: 106883. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106883.

6. Fu, W., Tian, Z., Amoozegar, A., & Heitman, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. Soil and Tillage Research. 2019; 193: 114–121. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.016.
7. Ma, X., You, Y., Yang, D., Wang, D., Hui, Y., Li, D., & Wu, H. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in Camellia Oleifera Forest. Agronomy. 2024; 14 (5): 1011. – DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14051011.
8. López-Bravo, E., Tijskens, E., González-Cueto, O., Herrera-Suárez, M., Lorenzo-Rojas, J.D., & Ramon, H. Simulation of clay soil de-compaction using discrete element method. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2019; 28 (2).
9. Hu, M., Gao, T., Dong, X.W., Tan, Q.T., Yi, C., Wu, F., & Bao, A.H. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). Soil and Tillage Research. 2023; 229: 105671. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671.
10. Bradley, A.C., Jaksa, M.B., & Kuo, Y.L. Ground response of rolling dynamic compaction - a finite element modeling approach. Frontiers in Built Environment. 2024; 9: 1334090. – DOI: https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1334090.
11. Kim, I., Seo, J., Woo, H., & Choi, B. Assessing Rutting and Soil Compaction Caused by Road Extraction Using Traditional and Remote Sensing Methods. Forests. 2025; 16 (1): 86. – DOI: https://doi.org/10.3390/f16010086.
12. Ghaffariyan, M. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. Silva Balcanica. 2021; 22 (2): 25–32. – DOI: https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e70035.
13. Раднаев Д.Н., Сергеев Ю.А., Абидуев А.А., Калашников С.С. Влияние конструкции шпоры катка для сплошного прикатывания на рыхление и уплотнение почвы. Дальневосточный аграрный вестник. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 114–121. – DOI: https://doi.org/10.22450/199996837_2022_4_114.
14. Лысыч М.Н., Малюков С.В., Шавков М.В., Гнусов М.А. Исследование полуавтоматического посадочного механизма для сеянцев с закрытой корневой системой в среде САПР с полноразмерным макетированием средствами 3D-печати. Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 144–161. – DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-144-161.
15. Черник К.Н., Елисеев С.Г. Обоснование рабочей скорости лесопосадочной машины для сеянцев с закрытой корневой системой. Хвойные бореальной зоны. – 2025. – Т. 43, № 1. – С. 85–91. – DOI: https://doi.org/10.53374/1993-0135-2025-1-85-91.
16. Song, W., Ren, L., Wang, J., Ma, Y., Guo, Y., Han, M., & Zhao, H. Methods for constructing soil dynamic models under intelligent cultivation: dynamic interaction mechanisms between farming tools with complex structures and soil. Agriculture. 2025; 15 (13): 1355. – DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15131355.
17. Charuk, A., Gawdzińska, K., & Dunaj, P. Finite element modeling of the dynamic response of plywood. Materials. 2024; 17 (17): 4358. – DOI: https://doi.org/10.3390/ma17174358.
18. Reza, M.N., Islam, M.N., Chowdhury, M., Ali, M., Islam, S., Kiraga, S., Lim, S.J., Choi, I.S., & Chung, S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. Machines. 2021; 9 (9): 183. – DOI: https://doi.org/10.3390/machines9090183.
19. Малюков С.В., Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н., Шавков М.В. Оптимизация параметров комбинированного орудия для сплошной обработки почвы - плоскорез и дисковый плуг. Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 3 (67). – С. 109–115. – DOI: https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-3-109-115.
20. Патент РФ на полезную модель № 232999 U1. Лесопосадочная машина / Малюков С.В., Войнаш С.А., Арико С.Э. и др.; патентообладатель Алтайский государственный университет. – 2025.
21. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622310 РФ. Результаты лабораторного эксперимента по определению сил сопротивления движению рабочих органов комбинированного почвообрабатывающего орудия / Малюков С.В., Петков А.Ф., Лысыч М.Н., Аксенов А.А.; правообладатель Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. – 2025.

22. Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Пилипенко В.Н., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации. Астраханский вестник экологического образования. – 2022. – № 5 (70). – С. 203–211.
23. Li, S., Diao, P., Zhao, Y., Miao, H., Li, X., & Zhao, H. Calibration of discrete element parameter of soil in high-speed tillage. INMATEH-Agricultural Engineering. 2023; 71: 231–242. – DOI: https://doi.org/10.35633/inmateh-71-21.
24. Gainullin, I.A. Modelling the interaction of thrusters with the soil using the discrete element method in rocky dem. International Research Journal. 2023; 5 (131). – DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.29.

References

1. Aikins, K. A., Ucgul, M., Barr, J. B., Awuah, E., Antille, D. L., Jensen, T. A., & Desbiolles, J. M. A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. *Agriculture*. 2023;13(3):541. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13030541.
2. Ye, R., Ma, X., Zhao, J., Liao, J., Liu, X., Xi, L., & Su, G. Optimization and Design of Disc-Type Furrow Opener of No-Till Seeder for Green Manure Crops in South Xinjiang Orchards. *Agriculture*. 2023;13(8):1474. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13081474.
3. Li, J., Tang, H., & Wang, X. Calibration of discrete element parameters for soil in different compaction states. *Advanced Powder Technology*. 2023;34(1):103878. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.103878.
4. Walunj, A., Chen, Y., Tian, Y., & Zeng, Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 2023;13(5):1260. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13051260.
5. Yeşilkaya, M., Daş, G. S., & Türker, A. K. A multi-objective multi-period mathematical model for an industrial symbiosis network based on the forest products industry. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;150:106883. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106883.
6. Fu, W., Tian, Z., Amoozegar, A., & Heitman, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. *Soil and Tillage Research*. 2019;193:114–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.016.
7. Ma, X., You, Y., Yang, D., Wang, D., Hui, Y., Li, D., & Wu, H. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in Camellia Oleifera Forest. *Agronomy*. 2024;14(5):1011. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14051011.
8. López-Bravo, E., Tijskens, E., González-Cueto, O., Herrera-Suárez, M., Lorenzo-Rojas, J. D., & Ramon, H. Simulation of clay soil de-compaction using discrete element method. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2019;28(2).
9. Hu, M., Gao, T., Dong, X. W., Tan, Q. T., Yi, C., Wu, F., & Bao, A. H. Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Soil and Tillage Research*. 2023;229:105671. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105671.
10. Bradley, A. C., Jaksa, M. B., & Kuo, Y. L. Ground response of rolling dynamic compaction - a finite element modeling approach. *Frontiers in Built Environment*. 2024;9:1334090. DOI: https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1334090.
11. Kim, I., Seo, J., Woo, H., & Choi, B. Assessing Rutting and Soil Compaction Caused by Road Extraction Using Traditional and Remote Sensing Methods. *Forests*. 2025;16(1):86. DOI: https://doi.org/10.3390/f16010086.
12. Ghaffariyan, M. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*. 2021;22(2):25–32. DOI: https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e70035.
13. Radnaev, D. N., Sergeev, Y. A., Abiduev, A. A., & Kalashnikov, S. S. Vliyanie konstruktsii shpory katka dlya sploshnogo prikatyvaniya na рыхление i uplotnenie pochvy [Influence of the design of the spur roller for continuous packing on soil loosening and compaction]. *Dal'nevostochnyi Agrarnyi Vestnik*. 2022;16(4):114–121. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.22450/199996837_2022_4_114.

14. Lysych, M. N., Malyukov, S. V., Shavkov, M. V., & Gnusov, M. A. Issledovanie poluavtomaticheskogo posadochnogo mekhanizma dlya seyantsev s zakrytoi kornevoi sistemoi v srede SAPR s polnorazmernym maketirovaniem sredstvami 3D-pechati [Research of a semi-automatic planting mechanism for seedlings with a closed root system in a CAD environment with full-size prototyping by means of 3D printing]. *Lesnoi Vestnik. Forestry Bulletin*. 2025;29(1):144–161. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-144-161.
15. Chernik, K. N., & Eliseev, S. G. Obosnovanie rabochei skorosti lesoposadochnoi mashiny dlya seyantsev s zakrytoi kornevoi sistemoi [Substantiation of the operating speed of a forest planting machine for seedlings with a closed root system]. *Khvoinye Boreal'noi Zony*. 2025;43(1):85–91. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.53374/1993-0135-2025-1-85-91.
16. Song, W., Ren, L., Wang, J., Ma, Y., Guo, Y., Han, M., & Zhao, H. Methods for constructing soil dynamic models under intelligent cultivation: dynamic interaction mechanisms between farming tools with complex structures and soil. *Agriculture*. 2025;15(13):1355. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15131355.
17. Charuk, A., Gawdzińska, K., & Dunaj, P. Finite element modeling of the dynamic response of plywood. *Materials*. 2024;17(17):4358. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17174358.
18. Reza, M. N., Islam, M. N., Chowdhury, M., Ali, M., Islam, S., Kiraga, S., Lim, S. J., Choi, I. S., & Chung, S. O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. *Machines*. 2021;9(9):183. DOI: https://doi.org/10.3390/machines9090183.
19. Malyukov, S. V., Bukhtoyarov, L. D., Lysych, M. N., & Shavkov, M. V. Optimizatsiya parametrov kombinirovannogo orudiya dlya sploshnoi obrabotki pochvy - ploskorez i diskovyi plug [Optimization of parameters of a combined tool for continuous soil cultivation - flat cutter and disc plow]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2025;3(67):109–115. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-3-109-115.
20. Patent RF na poleznuyu model' № 232999 U1. Lesoposadochnaya mashina [RF Patent for Utility Model No. 232999 U1. Forest planting machine]. Malyukov S. V., Voinash S. A., Arico S. E. et al.; patent holder Altai State University. 2025.
21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2025622310 RF. Rezul'taty laboratornogo eksperimenta po opredeleniyu sil soprotivleniya dvizheniyu rabochikh organov kombinirovannogo pochvoobrabatyvayushchego orudiya [Certificate of State Registration of the Database No. 2025622310 RF. Results of a laboratory experiment to determine the resistance forces to the movement of the working bodies of a combined tillage tool]. Malyukov S. V., Petkov A. F., Lysych M. N., Aksenov A. A.; certificate holder Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. 2025.
22. Tregubov, O. V., Laktionov, A. P., Mizin, Y. A., Komarova, O. V., Pilipenko, V. N., & Pokhvalenko, V. A. Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoi korevoi sistemoi v stepnoi i lesostepnoi zonakh yuga Rossiiskoi Federatsii [Experience in creating forest crops with a closed root system in the steppe and forest-steppe zones of the south of the Russian Federation]. *Astrakhanskii Vestnik Ekologicheskogo Obrazovaniya*. 2022;5(70):203–211. (In Russ.).
23. Li, S., Diao, P., Zhao, Y., Miao, H., Li, X., & Zhao, H. Calibration of discrete element parameter of soil in high-speed tillage. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2023;71:231–242. DOI: https://doi.org/10.35633/inmateh-71-21.
24. Gainullin, I. A. Modelling the interaction of thrusters with the soil using the discrete element method in rocky dem. *International Research Journal*. 2023;5(131). DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.131.29.

Сведения об авторах

Гнусов Максим Александрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности и правовых отношений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1653-4595, e-mail: mgnusov@ya.ru

Дручинин Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2128-2687, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru

✉ *Школьных Александр Васильевич* – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3311-5907, e-mail: alex.hk525@gmail.com

Лысыч Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3764-3873, e-mail: miklynea@yandex.ru

Information about authors

Maxim A. Gnusov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Life Safety and Legal Relations, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, 8 Timiryazev Street, Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1653-4595, e-mail: mgnusov@ya.ru

Denis Yu. Druchinin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 8 Timiryazev St., Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2128-2687, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru

✉ *Aleksandr V. Shkolnykh* – postgraduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, 8 Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3311-5907, e-mail: alex.hk525@gmail.com

Mikhail N. Lysych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, Metrology, Standardization and Certification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, Timiryazev St. 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3764-3873, e-mail: miklynea@yandex.ru

✉– For contacts/Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/23
УДК 630* 634.0.232: 623.746.4

Проектирование и испытание аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА

Михаил Н. Лысыч[1]✉, miklynea@yandex.ru, 0000-0002-3764-3873
Леонид Д. Бухтояров[1], vglta-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821
Максим А. Гнусов[1], mgnusov@ya.ru, 0000-0003-1653-4595
Денис Ю. Дручинин[1], druchinin.denis@rambler.ru, 0000-0003-2128-2687
Евгений В. Мартыновский[1], profootballjack@gmail.com, 0009-0000-0434-575X
Лариса В. Брындина[1], bryndinv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-2345-6789

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Аэросев лесных семян с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляет собой эффективный метод быстрого и недорогого лесовосстановления, что особенно актуально в условиях современных экологических вызовов. Обзор исследований и технической оснащенности в этой области показал, что сейчас отсутствуют отечественные высевающие аппараты для БПЛА способные осуществлять точный посев дражированных лесных семян с их внедрением в поверхностный слой почвы. Цель данного исследования заключается в разработке и испытании высевающего аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА, а также изучение его рабочих режимов для определения параметров эффективного заглубления семян. Материалы и методы исследования включают 3D-моделирование геометрии высевающего аппарата с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Моделирование выполняется с использованием метода дискретных элементов (DEM), представляющего почву в виде сферических частиц разной степени связности, а индентор в виде твердой сферы с заданными физическими свойствами (масса, положение, скорость, сила). Взаимодействие частиц описывается моделью контакта с пружиной и демпфером. Ударное взаимодействие осуществляется при скоростях индентора 25, 50 и 75 м/с с несвязной, срендесвязной и связной почвами. Лабораторный эксперимент проводится на несвязных почвах при скорости движения индентора 75 м/с. Результаты показали, что, согласно 3D-модели, масса высевающего аппарата составила 1140 г, а масса изготовленного экспериментального образца 1074 г. По результатам DEM-моделирования установлено, что проникновение индентора наблюдается только на несвязных почвах при скоростях 75 м/с, однако для исключения выброса индентора из образовавшейся воронки достаточно скорости 25 м/с. В случае среднесвязных и связных почв наблюдается только незначительный боковой охват индентора почвенными частицами или нахождение на поверхности в пределах образованного углубления. Экспериментальная проверка выявила ряд расхождений с данными моделирования, так глубина проникновения при моделировании составила 17,5 мм, а в лабораторном эксперименте 24,6 мм. При этом средний диаметр образуемых воронок в верхней части напротив был больше для данных моделирования и составил 53,5 мм, а для экспериментальных данных 19,3 мм. Для уменьшения расхождений в дальнейшем необходимо модифицировать модель с учетом влияния влажности, гранулометрического состава и объемной плотности естественных почв.

Ключевые слова: *высевающий аппарат, аэросев, БПЛА, имитационное моделирование, системы автоматизированного проектирования (САПР), испытания, метод дискретных элементов (DEM)*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876, https://rscf.ru/project/25-19-00876/.

Благодарности: Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Проектирование и испытание аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА / М.Н. Лысыч, Л.Д. Бухтояров, М.А. Гнусов, Д.Ю. Дручинин, Е.В. Мартыновский, Л.В. Брындина // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 387-404. – *Библиогр.: с. 401-403 (24 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/23.

Поступила 01.06. 2025. ***Пересмотрена*** 12.11.2025. ***Принята*** 3011.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2024.

Article

Design and testing of a precision seeding device for aerial sowing of pelleted forest seeds from a UAV

Mikhail N. Lysych[1]✉, miklynea@yandex.ru, 0000-0002-3764-3873
Leonid D. Bukhtoyarov[1], vglta-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821
Maxim A. Gnusov[1], mgnusov@ya.ru, 0000-0003-1653-4595
Denis Y. Druchinin[1], druchinin.denis@rambler.ru, 0000-0003-2128-2687
Evgeny V. Martynovsky[1], profootballjack@gmail.com, 0009-0000-0434-575X
Larisa V. Bryndina[1], bryndinv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-2345-6789

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva street, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

Aerial sowing of forest seeds using unmanned aerial vehicles (UAVs) is an effective method for rapid and inexpensive reforestation, which is particularly relevant in the face of modern environmental challenges. A review of research and technical equipment in this field revealed that domestically produced sowing device for UAVs capable of precisely sowing pelleted forest seeds and incorporating them into the surface soil layer are currently lacking. The objective of this study is to develop and test a precision sowing device for aerial sowing of pelleted forest seeds from a UAV, as well as to study its operating modes to determine the parameters for effective seed placement. The research materials and methods include 3D modeling of the sowing device geometry using computer-aided design (CAD) systems. The modeling is performed using the discrete element method (DEM), representing the soil as spherical particles of varying degrees of cohesion and the indenter as a solid sphere with specified physical properties (mass, position, velocity, force). Particle interaction is described by a contact model with a spring and damper. Impact interaction occurs at indenter velocities of 25, 50, and 75 m/s with cohesionless, moderately cohesive, and cohesive soils. A laboratory experiment is conducted on cohesionless soils at an indenter speed of 75 m/s. The results showed that, according to the 3D model, the mass of the sowing device was 1140 g, while the mass of the manufactured experimental sample was 1074 g. DEM modeling revealed that indenter penetration was observed only in cohesionless soils at speeds of 75 m/s. However, a speed of 25 m/s was sufficient to prevent the indenter from being ejected from the resulting crater. In the case of moderately cohesive and cohesive soils, only minor lateral coverage of the indenter by soil particles or its presence on the surface within the formed depression was observed. Experimental verification revealed several discrepancies with the modeling data: the penetration depth in the modeling was 17.5 mm, while in the laboratory experiment it was 24.6 mm. Moreover, the average diameter of the formed craters in the upper part was, conversely, larger for the modeling data and

amounted to 53.5 mm, while for the experimental data it was 19.3 mm. To reduce discrepancies in the future, it is necessary to modify the model taking into account the influence of moisture, particle size distribution and bulk density of natural soils.

Keywords: *seeding device, aerial sowing, UAV, simulation modeling, computer-aided design (CAD), testing, discrete element method (DEM)*

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation №25-19-00876, https://rscf.ru/project/25-19-00876/.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Martynovsky E.V., Bryndina L.V. (2025). Design and testing of a precision seeding device for aerial sowing of pelleted forest seeds from a UAV. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 387-404 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/23.

Received 01.06. 2025. ***Revised*** 12.11.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Введение

Интенсификация процессов глобального обезлесения и климатических изменений актуализирует необходимость разработки высокотехнологичных методов лесовосстановления [1]. Технология аэросева с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляет особый интерес благодаря операциональным преимуществам и экономической эффективности - прямой посев в 10-30 раз дешевле традиционных методов [1]. Однако эффективность технологии ограничена комплексом факторов, снижающих всхожесть семян до уровня менее 10% [1].

Проведенный анализ оборудования ведущих компаний (DroneSeed, AirSeed, Flash Forest, Dronecoria) выявил четыре основных типа высевающих аппаратов. Наибольший потенциал демонстрируют аппараты точного высева с ускорением дражированных семян потоком воздуха, используемые компаниями Dendra Systems, Flash Forest, AirSeed Technologies и Ghaf Tree Project.

Согласно лесоводческим рекомендациям для Российской Федерации, аэросев может применяться на участках, пострадавших от пожаров, с супесчаными и хорошо дренированными суглинистыми почвами, где огонь полностью уничтожил лесную подстилку [2], а также на транспортно-удаленных лесных участках и склонах, куда затруднен доступ тракторной техники [3].

Для моделирования процессов ударного взаимодействия объектов сферической формы с дискретной средой широко используются экспериментальные и DEM-методы. Фундаментальные основы процессов ударного проникновения в сыпучие гранулированные слои были заложены в работе Hou M. и др. [6] (рисунок 1а), где методами высокоскоростной съемки детально исследована динамика формирования полости и выброса частиц.

Значительный вклад в понимание влияния механических свойств индентора внесло исследование Ye X. и Van Der Meer D. [7], продемонстрировавшее особенности кратерообразования и поведения при ударе для деформируемых гидрогелевых сфер в зависимости от их модуля Юнга.

Особую актуальность для моделирования реальных почвенных условий представляют работы Zhang X. и коллектива авторов [8-10], в которых последовательно исследуется влияние капиллярных эффектов и всасывания в влажных гранулированных материалах на динамику удара, силу сопротивления и глубину проникновения сферического индентора.

Важным аспектом при моделировании поведения семян в почве является учет вращательного движения. Исследование Carvalho D.D. и др. [11] специально посвящено анализу проникновения вращающейся сферы в гранулированную среду, где установлено существенное влияние вращения на траекторию и характеристики внедрения.

Проведенный анализ современных исследований, выполненных методом дискретных элементов (DEM), демонстрирует широкие возможности данного подхода для изучения динамики ударного взаимодействия в гранулированных средах.

В исследовании Ye X. et al. [12] (рисунок 1б) методом DEM изучен наклонный удар снаряда о гранулированную среду. Авторы установили количественные зависимости глубины проникновения от угла атаки и детально проанализировали динамику процесса.

Работа Shen W. et al. [13] посвящена анализу влияния межчастичного трения и демпфирования на динамику удара сферического снаряда о грунтовое основание. Авторы продемонстрировали, что изменение коэффициента трения между частицами на 30% приводит к значительному изменению глубины проникновения (до 25%).

В исследовании Liang S. et al. [14] подробно изучены механизмы передачи и диссипации энергии при ударе индентора о гранулированный материал. Установлено, что до 60% начальной кинетической энергии рассеивается за счет работы сил трения между частицами.

Значительный интерес представляет работа Zhang X. et al. [15], в которой исследовано влияние формы частиц на динамику ударного взаимодействия. Показано, что использование несферических частиц в моделировании позволяет более точно воспроизводить экспериментальные данные.

Важным направлением развития DEM является применение гибридных методов, что продемонстрировано в работе Lin J. et al. [16]. Авторы использовали CFD-DEM подход для моделирования проникновения снаряда в насыщенные жидкостью гранулированные слои.

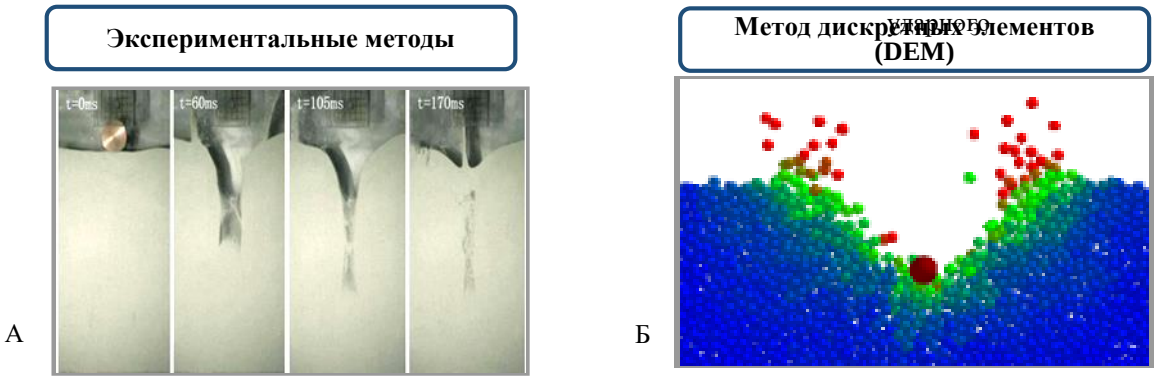
Исследование Wada K. et al. [17] демонстрирует возможности DEM для моделирования высокоскоростных ударов (100-900 м/с) и кратерообразования. В работе Ghazi Alshanti W. [18] изучено проникновение вращающегося снаряда в гранулированные системы.

Исследования Sunday C. и соавт. [19, 20] представляют систематический анализ влияния гравитационных условий на процессы ударного взаимодействия в гранулированных средах. В работе [19] проведено сравнительное исследование производительности различных реализаций метода дискретных элементов (DEM) для моделирования ударных процессов в условиях различной гравитации. В исследовании [20] разработана масштабируемая модель столкновений для медленных взаимодействий, учитывающая гравитационные эффекты.

Исследование Ye X. и Zhang C. [21] посвящено анализу влияния геометрии индентора на силовое воздействие и реологические свойства гранулированных сред при ударном взаимодействии. Авторы выявили, что в квазистатическом режиме сила сопротивления не зависит от скорости и может быть описана через расширенную модель локального трения, учитывающую площадь контакта.

Работа Wang F. и соавт. [22] представляет комплексное исследование модели силы сопротивления при вертикальном проникновении в гранулированную среду, основанное на комбинированном использовании DEM-моделирования и экспериментальных данных. Особенностью работы является системный учет таких ключевых параметров, как форма носовой части индентора, скорость воздействия, диаметр частиц гранулированной среды и коэффициент трения между ними. Проведенный анализ выявил, что результаты существующих исследований нельзя использовать напрямую для описания процессов ударного взаимодействия дражированных семян с почвенной средой из-за значительных различий в свойствах сред, инденторов и режимов взаимодействия.

Рисунок 1. Методы исследования процессов ударного



взаимодействия объектов с дискретной средой

Figure 1. Methods for studying the processes of impact interaction of objects with a discrete medium

Источник: А – Hou M. и др. [6], Б – результаты моделирования авторов

Source: A – Hou M. et al. [6], B – authors' own modeling results

Таким образом, существует потребность в специализированном исследовании ударного взаимодействия дражированных семян с почвенными средами.

Целью данного исследования является разработка и испытание высевающего аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА, а также изучение его рабочих режимов для определения параметров эффективного заглубления семян.

Материалы и методы

Объектом исследования является пневматический высевающий аппарат точного высева для аэросева лесных семян с БПЛА.

В данной работе спроектирована параметрическая 3D-модель высевающего аппарата точного высева дражированных семян с ускорением потоком воздуха (рисунок 2), который состоит из направляющего канала 1, корпуса 2, крышки корпуса 3, двигателя 4, замкового узла 5, семенного бункера 6, заслонки семенного бункера 7, высевающего барабана 8, подшипника 9, датчика положения 10, воздушного распределителя 11, нагрузочной пружины 12 и контактной колодки 13. 3D-модель создавалась адаптированной для быстрого прототипирования с использованием 3D-печати, что позволяет в кратчайшие сроки создавать функциональные прототипы из инженерных полимерных материалов с минимальными массовыми характеристиками [5].

Виртуальный стенд, созданный для исследования процессов взаимодействия дражированного семени с почвенной средой, представляет собой фрагмент почвенного пласта размером 100x100x50 мм (рисунок 3). Плотность частиц составляет 2500 кг/м^3 что соответствует плотности твердой фазы почвы, масса частицы равна 0,011 г, диаметр 2 мм. Полученный фрагмент почвенного пласта включает 64547 частиц общей массой 0,676 кг с насыпной плотность 1352 кг/м^3 что соответствует плотности лесных почв.

Сферический индентор (далее по тексту дражированное семя) диаметром 6 мм генерируется по центру почвенного пласта на высоте 200 мм от его поверхности. Плотность дражированного семени принята равной 1900 кг/м^3 что соответствует усредненной плотности дражировочных смесей, разрабатываемых в данный момент авторами статьи и семян сосны.

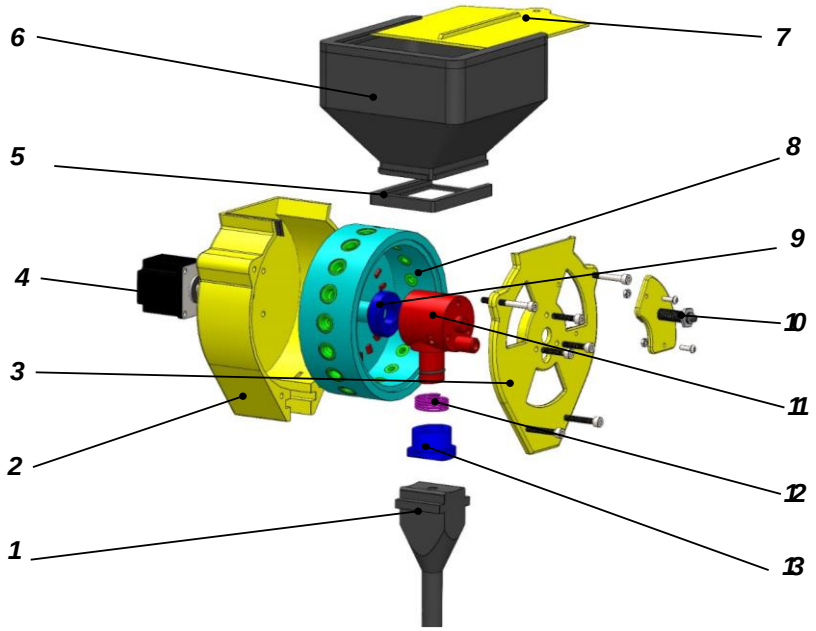


Рисунок 2. Высевающий аппарат точного высева с ускорением дражированных семян потоком воздуха
Figure 2. Precision seeding device with acceleration of pelleted seeds by an air flow
Источник: собственная 3D-модель авторов | Source: authors' own 3D model

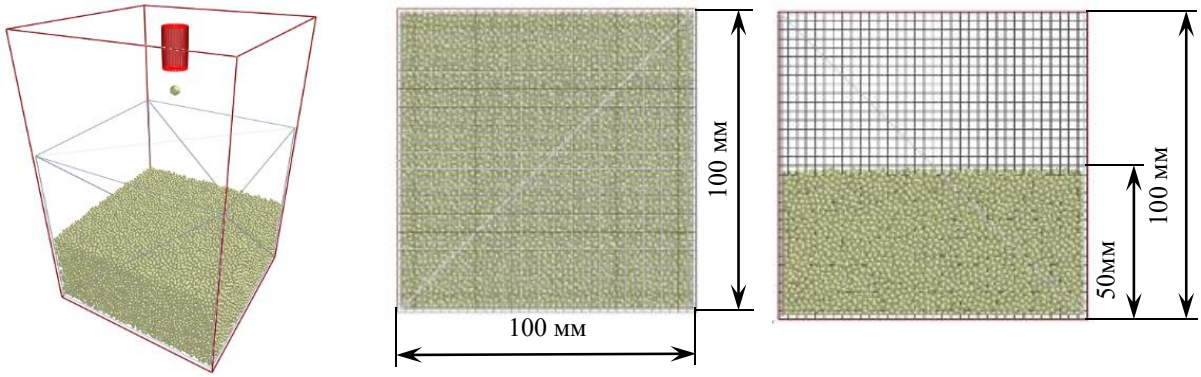


Рисунок 3. Виртуальный стенд для исследования внедрения дражированного семени в почвенный пласт
Figure 3. Virtual test bench for studying the introduction of pelleted seed into the soil layer
Источник: собственная композиция авторов| Source: authors' own composition

В таблице 1 представлены основные параметры DEM-модели позволяющие воспроизводить свойства несвязных, среднесвязных и связных почв. Для определения этих параметров были приняты величины удельного сцепления (c_n) свойственные для рассматриваемых типов почв. Далее при постоянном коэффициенте жесткости (k_{zh}) подбирался порог растяжения t_s необходимый для получения заданного удельного сцепления и коэффициент демпфирования (k_{damp}) для обеспечения стабильности системы.

Движение дискретных элементов под действием упругих сил (F^Y) и сил сухого и вязкого трения (F^C и F^B) рассчитывается по законам классической динамики (рисунок 4). Моделирование производится в трехмерном декартовом пространстве (x, y, z). Состояние каждого элемента E_i задается шестью переменными: координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и компонентами скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}). Более подробное описание

математической модели приводится в другой работе авторов [24].

Таблица 1.

Параметры DEM-модели

Тип почвы	Порог растяжения, t_s	Коэффициент демпфирования k_{damp}, Н·с/м	Коэффициент жесткости k_{zh}, Н/м	Получаемое удельное сцепление c_n, кПа
Несвязная	1,05	30	$6{,}0 \cdot 10^4$	0
Среднесвязная	1,12	40	$6{,}0 \cdot 10^4$	15000
Связная	1,18	50	$6{,}0 \cdot 10^4$	30000

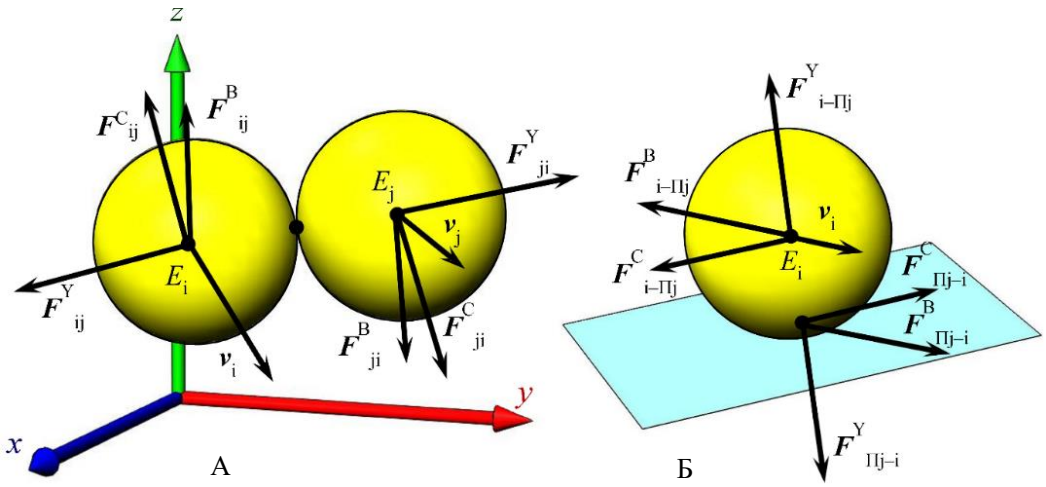


Рисунок 4. Схемы силового контакта дискретных элементов:
А – контакт двух дискретных элементов; Б – контакт дискретного элемента и твердой поверхности
Figure 4. Diagrams of force contact of discrete elements
A – contact of two discrete elements; B – contact of a discrete element and a solid surface
Источник: собственная композиция авторов| Source: authors' own composition

Мониторинг процесса моделирования производился с использованием цветовых поверхностных эпюр скоростей движения частиц. Синий цвет соответствует нулевой скорости, красный скорости в 1м/с и более, оттенки зеленого – промежуточные значения (рисунок 5, *а*). Контроль параметров производился в центральном срезе в продольно-вертикальной плоскости, проходящем через ось движения частицы (рисунок 5, *б*).

В процессе моделирования измерялась глубина проникновения дражированного семени и его смещение в горизонтальной плоскости в случае отскока. При этом глубина проникновения фиксировалась по нижней точке семени. Также измеряется наибольшая глубина воронки. Для лабораторных исследований процесса взаимодействия дражированных семян с почвенной средой бы создан испытательный стенд (рисунок 6). Он состоит из основания 1 с кронштейнами крепления камеры и экрана, подвижного кронштейна с механизмом регулировки угла отклонения от вертикали 2, высевающего аппарата 3, крепления для фиксации аппарата 4, хронографа 5, камеры для скоростной съемки 6, емкости для почвы 7.

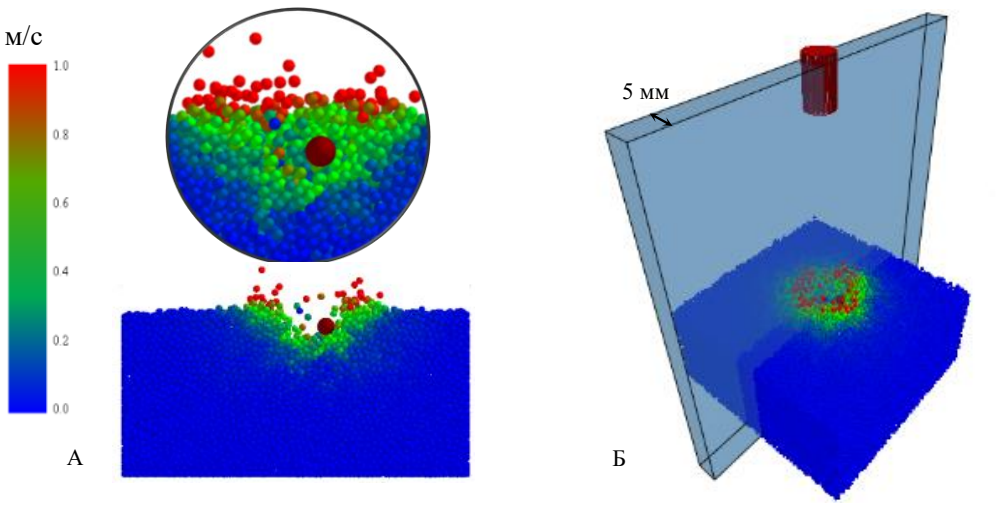


Рисунок 5. Мониторинг процесса моделирования:
А – цветовые поверхностные эпюры; Б – центральный срез
Figure 5. Monitoring the modeling process:
A – color surface diagrams; B – central section
Источник: собственная композиция авторов| Source: authors' own composition

Для измерения скорости использовался хронограф WoSporT WST-X01. Он позволяет исследовать объекты диаметром 0,01-20 мм, с частотой до 120 шт/с, диапазон измеряемых скоростей 0-800 м/с при погрешности до 0,3 %. Для съемки процесса применялась USB камера со скоростью съемки 260 fps. Разгон дражированного семени диаметром 5,95мм и весом 0,22 г осуществлялся страйкбольным воздушным компрессором. Скорость полета регулировалась подбором жесткости пружины компрессора.

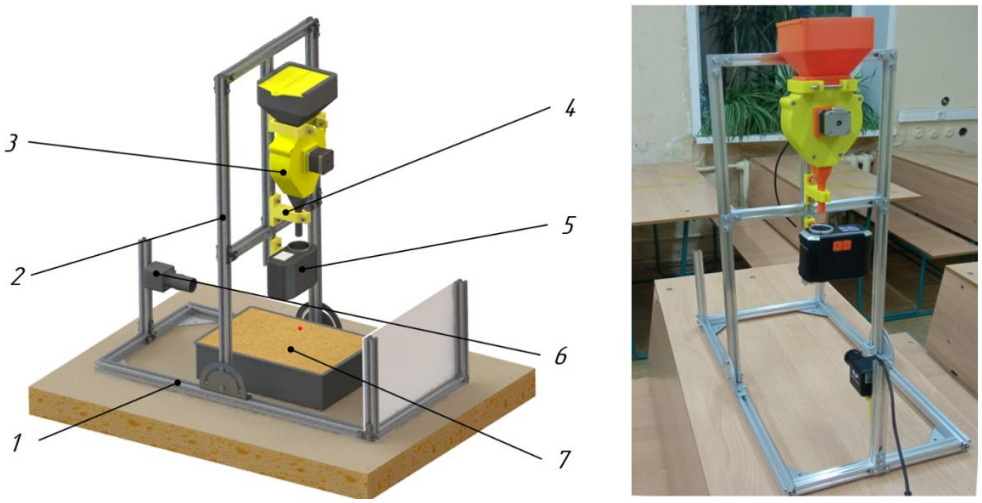


Рисунок 6. Лабораторный стенд
Figure 6. Laboratory stand
Источник: собственная композиция авторов| Source: authors' own composition

Для проведения опыта использовалась несвязная песчаная почва, взятая непосредственно с участка подлежащего лесовосстановлению (рисунок 7). Гранулометрический состав типичный для песчаных почв сосновых лесов Воронежской области: песок 0,063…2 мм от 70% до 95%; пыль 0,002…0,063 мм от 5 до 25%; глина < 0,002 мм менее 5%. Влажность почвы 10 % по массе.

Поверхность выравнивалась вровень с боковыми стенками короба. В опытах выполнялась серия отстрелов, в которой для исключения взаимного влияния выдерживалось расстояние между соседними воронками и стенками не менее 50 мм.

Для фиксации параметров образованных кратеров и глубин проникновения семени применялся штангенинструмент. Измерение диаметра кратера в верхней части выполнялось с использованием штанги штангенглубиномера ШГ, укладываемой на бортики ящика. Для измерения глубин проникновения дражированного семени применялся глубиномер штангенциркуля ШЦ-1, устанавливаемый опорной поверхностью на штангу штангенглубиномера. Сначала измерялся диаметр кратера в двух взаимоперпендикулярных направлениях и вычислялось среднее значение, а затем выполнялся частичное раскапывание дражированного семени и контроль глубины проникновения.

Регулировка скорости высева при проверке стабильности работы высевающего аппарата осуществлялась изменением скорости вращения шагового двигателя высевающего барабана.

В качестве показателя однородности данных был принят коэффициент вариации (CV). Число повторов опытов при моделировании и эксперименте определялось пилотной серией экспериментов, проводившейся до достижения CV менее 10%.



Рисунок 7. Исследование проникновения сферического индентора в почву
Figure 7. Study of penetration of a spherical indenter into soil
Источник: собственное фото авторов| Source: authors' own photo

Результаты и их обсуждение

Согласно разработанной параметрической 3D-модели, масса высевающего аппарата составила 1140 г, при этом масса изготовленного экспериментального образца равна 1074 г. Незначительное снижение массы объясняется возможностью облегчения пластиковых деталей за счет создания внутренних полостей при изготовлении с применением 3D-печати. Центр масс незначительно смещен в поперечно-вертикальной плоскости в сторону шагового двигателя высевающего барабана (рисунок 8, *а*).

Максимальный полезный объем бункера равен 1,92 л, соответственно при принятой насыпной плотности семян в 560 г/л их общая масса равняется 1075 г. Масса полученная при засыпке экспериментального образца высевающего аппарата дражированными семенами сосны обыкновенной составила 1017 г. Центр масс загруженного бункера расположен по центру в горизонтальной плоскости что исключает внесение дисбаланса в высевающий агрегат (рисунок 8, *б*).

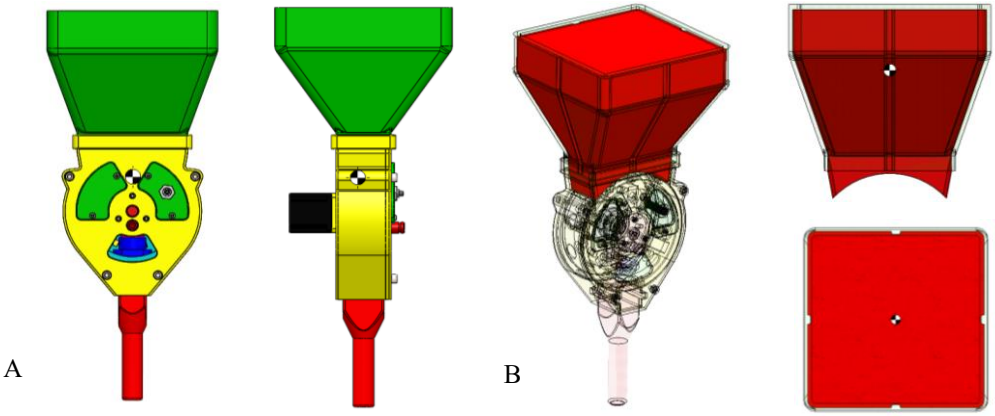


Рисунок 8. Исследование массовых характеристик:
А – высевающего аппарата; Б – семенного бункера
Fig. 8. Study of mass characteristics:
A – sowing unit; B – seed hopper
Источник: собственная 3D-модель авторов | Source: authors' own 3D model

На рисунке 9 приводятся цветовые эпюры центрального среза почвы, демонстрирующие процесс внедрения дражированного семени в несвязную почву при скоростях 25, 50 и 75 м/с.

Анализ данных для несвязных почв показывает, что при скоростях 25 и 50 м/с глубина воронки несколько больше, чем глубина проникновения семени, наблюдается продольное смещение семени вверх по стенке образованной воронки, без его выброса за пределы воронки. При скорости движения в 75 м/с напротив глубина проникновения больше, чем глубина воронки, что обеспечивает полное засыпание семени почвой.

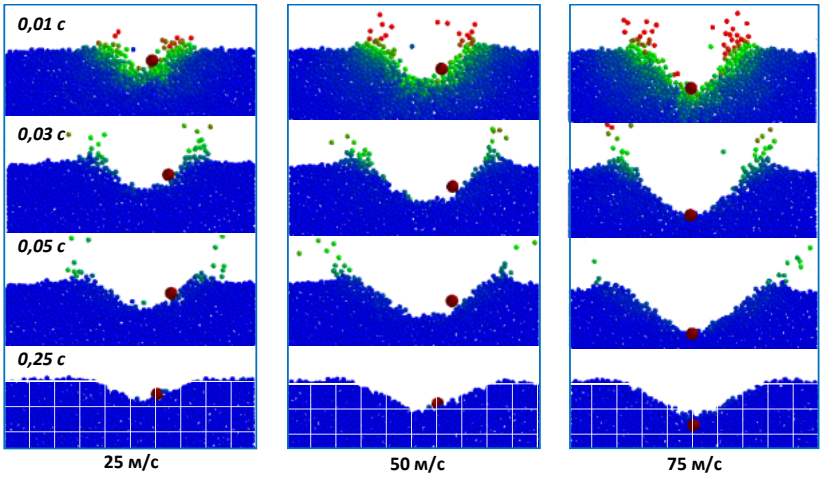


Рисунок 9. Процесс внедрения семени в несвязную почву
Figure 9. The process of introducing a seed into loose soil
Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

На рисунке 10 показаны цветовые эпюры, демонстрирующие процесс внедрения дражированного семени в среднесвязную почву.

При скорости 25 м/с происходит выброс семени из воронки за пределы зоны моделирования во всех экспериментах. При скорости 50 м/с вероятность выброса семени снижается до 10%, при 75м/с выброс не наблюдается. Глубина воронки при скоростях 50 и 75 м/с несколько больше, чем глубина проникновения семени.

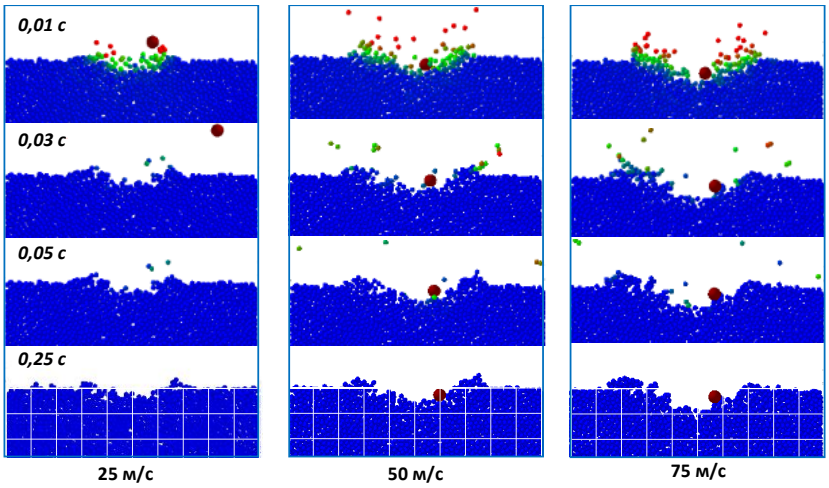


Рисунок 10. Процесс внедрения семени в среднесвязную почву
Figure 10. The process of introducing a seed into medium-cohesive soil
Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

На рисунке 11 показаны цветовые эпюры, демонстрирующие процесс внедрения дражированного семени в связную почву. При скорости 25 м/с происходит выброс семени из воронки за пределы зоны моделирования во всех экспериментах. При скорости 50 м/с вероятность выброса семени снижается до 30% и при 75 м/с до 10%. Глубина воронки при скоростях 50 и 75 м/с также больше, чем глубина проникновения семени.

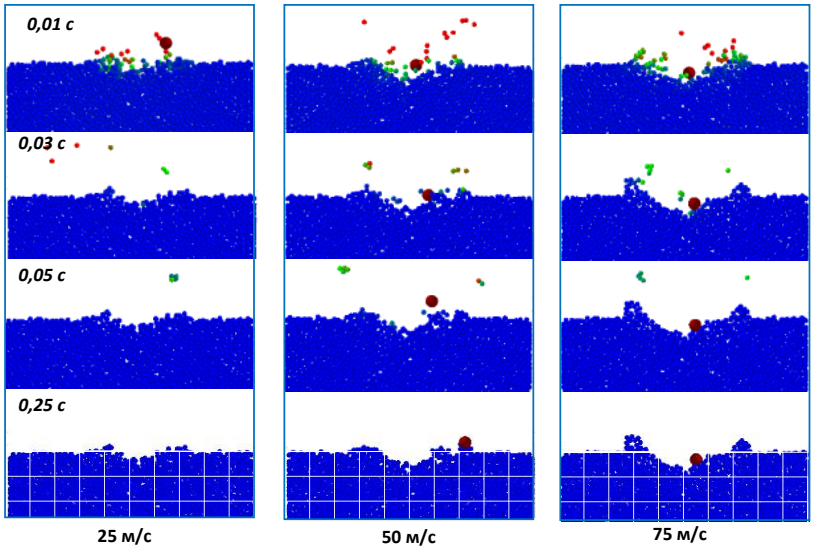


Рисунок 11. Процесс внедрения семени в связную почву
Figure 11. The process of introducing a seed into cohesive soil
Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

На рисунок 12 приводятся сводные данные о средних глубинах воронок и средних глубинах проникновения на разных типах почв.

Можно сделать предварительные выводы, основанные на тенденциях, выявленных в моделировании. На несвязанных почвах достаточно скорости дражированного семени в 25 м/с для исключения выброса семени из образовавшейся воронки и 75 м/с для 100% проникновения в поверхностный слой. На среднесвязных и связных почвах для обеспечения менее 30% выбросов семени за пределы воронки необходима скорость не менее 50 м/с. Коэффициент вариации (CV) не превышал 11,2% при числе повторов каждого опыта n=10.

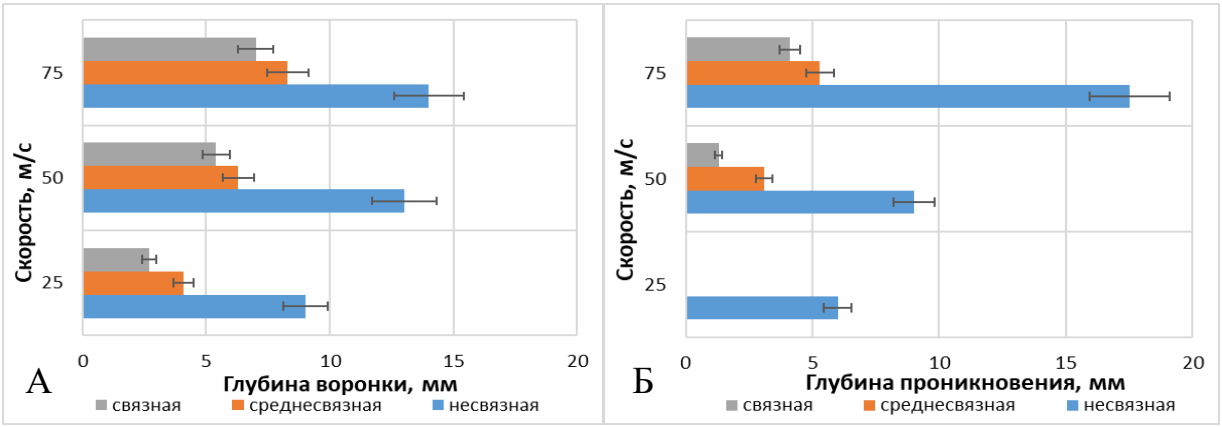


Рисунок 12. Средние глубины на разных типах почв:
А – проникновения дражированных семян; Б – образовавшихся воронок
Figure 12. Average depths in different soil types:
A – penetration of pelleted seeds; B – formed craters
Источник: данные моделирования авторов | Source: authors' own modeling data

Для проверки данных моделирования выполнен лабораторный эксперимент. На рисунке 13 показаны фотографии процесса ударного взаимодействия, полученные с применением скоростной камеры и даны аналогичные стадии процесса, полученные при моделировании.

Для достижения коэффициента вариации (CV) равного 10,4 % потребовалось повторов каждого опыта n=14.

На рисунке 14, *а* представлено сравнение данных, полученных при имитационном моделировании и в лабораторном эксперименте. Анализ данных показал заметные различия. Данные моделирования показали, что средние значения на несвязных почвах при скорости дражированного семени 75 м/с составили: глубины проникновения семян 17,5 мм, глубины воронок 14 мм. В то же время в данные, полученные в лабораторных исследованиях на песчаных почвах, взятых непосредственно с участка лесовосстановления при аналогичной скорости в 75 м/с, составили: глубины проникновения семян 24,6 мм, глубины воронок 19,3 мм. При этом средний диаметр образуемых воронок в верхней части напротив был больше для данных моделирования и составил 53,5 мм, а для экспериментальных данных 19,3 мм.

Столь заметные различия вероятно связанны со значительно меньшими размерами песчаных частиц в почве, использованной в лабораторном эксперименте и с их более высокой влажностью.

Также была выполнена проверка стабильности работы высевающего аппарата (рисунок 14, б), характеризующая количество пропусков семян.

Полученные экспериментальные данные показывают, что при увеличении скорости вращения барабана высевающего аппарата снижается стабильность захвата семян что аналогично данным, полученным при моделировании. При этом экспериментальные данные отличаются меньшим процентом захваченных семян в сравнении с данными моделирования. Так, например, при скорости 180 градусов/с высевается 93,3% семян что на 3% меньше, чем при моделировании.

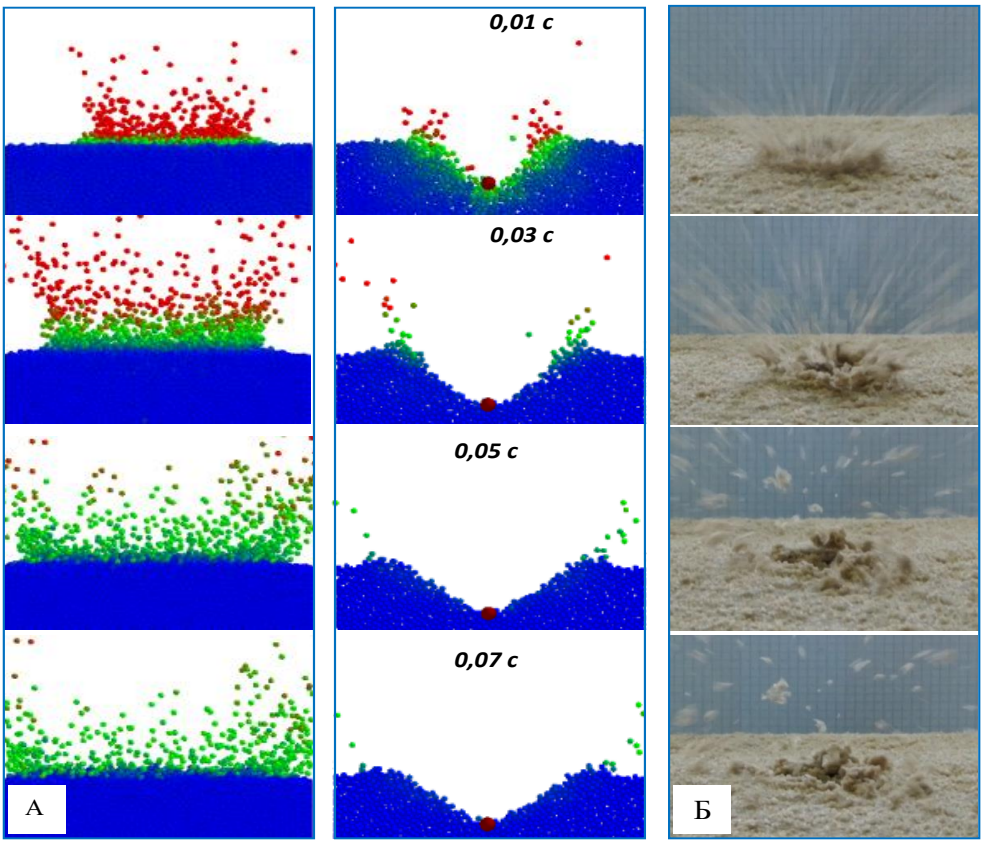


Рисунок 13. Процесс внедрения семени в слабосвязную почву:
А – моделирование; Б – эксперимент
Figure 13. The process of seed placement in weakly cohesive soil:
A – simulation; B – experiment
Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

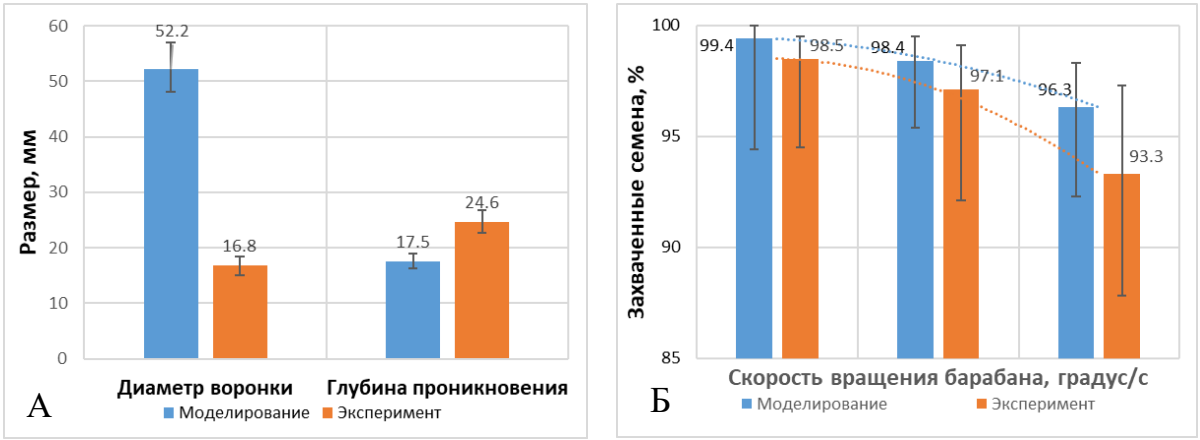


Рисунок 14. Сравнение данных моделирования и лабораторного эксперимента:
А – диаметр воронки и глубина проникновения; Б – стабильность захвата
Figure 14. Comparison of simulation and laboratory experiment data:
A – funnel diameter and penetration depth; B – grip stability
Источник: данные моделирования авторов | Source: authors' own modeling data

Выводы

1. Масса высевающего аппарата, полученная по 3D-модели, составила 1140 г, а полученная при взвешивании экспериментального образца 1074 г. Незначительное снижение объясняется возможностью облегчения деталей за счет создания внутренних полостей при изготовлении с применением 3D-печати.

2. Моделирование показало, что проникновение дражированного семени наблюдается только на несвязных почвах при скоростях 75 м/с. При этом семя охватывается почвенными частицами с боковых сторон и сверху. Однако для исключения выброса семени из образовавшейся воронки уже достаточно скорости дражированного семени в 25 м/с. В случае среднесвязных и связных почв может наблюдаться только незначительный боковой охват семени почвенными частицами или нахождение на поверхности в пределах образованного углубления. При этом глубина воронки больше, чем глубина проникновения так как дражированное семя располагается не на дне воронки. Для обеспечения менее 30% выбросов семени за пределы воронки необходима скорость не менее 50 м/с.

3. Экспериментальная проверка, проводимая на несвязных почвах со скоростью движения дражированного семени 75 м/с выявила ряд расхождений с данными моделирования. Глубина проникновения при моделировании составила 17,5 мм, а в лабораторном эксперименте 24,6 мм. При этом средний диаметр образуемых воронок в верхней части напротив был больше для данных моделирования и составил 53,5 мм, а для экспериментальных данных 19,3 мм. Столь заметные различия вероятно связанны со значительно меньшими размерами песчаных частиц в сравнении с имитирующими их дискретными элементами и их более высокой влажностью. Таким образом, разработанная DEM-модель требует дополнительной калибровки на реальных почвах с учетом их гранулометрического состава и влажности для повышения прогнозной точности.

4. Проверка стабильности работы высевающего аппарата показала, что как в лабораторном эксперименте, так и при моделировании с увеличением скорости вращения барабана высевающего аппарата снижается стабильность захвата семян. Экспериментально подтверждена адекватность модели работы высевающего барабана, однако модель склонна давать завышенные на 3-5% значения стабильности захвата, что необходимо учитывать при проектировании.

5. Дальнейшим развитием данного исследования будет изучение прочностных характеристик, существующих дражированных семян и на основе полученных данных введение в виртуальный эксперимент разрушаемых дражированных семян различных диаметров. Это даст возможность исследовать величины допустимых скоростей разгона дражированного семени не вызывающие разрушения его оболочки, повысит точность модели и позволит определить эксплуатационные ограничения высевающего аппарата. Также для уменьшения расхождений в дальнейшем необходимо модифицировать модель с учетом влияния влажности, гранулометрического состава и объемной плотности естественных почв.

Список литературы

1. Mohan M. et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. Remote Sens. 2021, 13: 1-30. – DOI: https://doi.org/10.3390/rs13132596.

2. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2020 № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений»: зарегистрировано в Мин-ве юстиции РФ от 18.12.2020 г., № 61556.

3. Каляшов В. А., До Т.А., Хитров Е. Г., Григорьева О. И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек. Resources and Technology. 2022; 19: 1-47. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6163.

4. Lysych M.N., Chernyshev V.V., Nagaytsev V.M. Design and Simulation of Seed Metering Device for Aerosowing of Forest Pelleted Seeds. J. Phys. Conf. Ser. 2021; 2032: 1-7. – DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012062.

5. Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs. Inventions. 2021; 83: 1-26. – DOI: https://doi.org/10.3390/inventions6040083.

6. Hou M., Peng Z., Liu R., Liu K., Li J., Li H. Projectile Impact and Penetration in Loose Granular Bed. Science and Technology of Advanced Materials. 2005; 6(7): 855-859. – DOI: 10.1088/1468-6996/6/7A08.

7. Ye X., Van Der Meer D. Hydrogel Sphere Impact Cratering, Spreading and Bouncing on Granular Media. Granular Matter. 2021; 23(4): 80. – DOI: 10.1007/s10035-021-01139-w.

8. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen H., Liu R., Zhao T. Dynamic Characteristics of Sphere Impact into Wet Granular Materials Considering Suction. Powder Technology. 2023; 415: 118147. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118147.

9. Zhang X., Wang C., Li H., Yang J., Zhou W., Liu Y. The Force and Dynamic Response of Low-Velocity Projectile Impact into 3D Dense Wet Granular Media. Physical Review E. 2024; 109(2): 024901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.109.024901.

10. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen X., Liu M. Resistance Force Scaling and the Solution for Penetration Depth of Impacting Wet Granular Materials. Journal of Fluid Mechanics. 2025; 987: 45. – DOI: 10.1007/s40571-024-00867-z.

11. Carvalho D.D., Bertho Y., Franklin E. Penetration of a Spinning Sphere impacting a Granular Medium. Physical Review E. 2024; 110(1): 014902. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.014902.

12. Ye X., Zhao T., Wang H., Liu K., Zhang R., Chen L. Projectile Oblique impact on Granular Media: Penetration Depth and Dynamic Process. Powder Technology. 2021; 378: 144-152. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.065.

13. Shen W., Zhang J., Liu K., Wang X., Li M., Yang H. Influence of Inter-Particle Friction and Damping on the Dynamics of Spherical Projectile Impacting Onto a Soil Bed. Journal of Terramechanics. 2022; 101: 35-45. – DOI: 10.1016/j.jterra.2022.03.002.

14. Liang S., Xu Y., Wang J. On Energy Transfer and Dissipation of Intruder Impacting Granular Materials based on Discrete Element Simulations. Granular Matter. 2022; 24(3): 88. – DOI: 10.1007/s10035-022-01254-2.

15. Zhang X., Wang Y., Li J., Chen H., Liu R., Zhao T. The Effect of Particle Shape on The Dynamics of Spherical Projectile Impacting into Granular Media. Physical Review E. 2024; 110(3): 034901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.034901.

16. Lin J., Zhao T., Jiang M. Investigating Projectile Penetration into Immersed Granular Beds Via CFD-DEM Coupling. Powder Technology. 2023; 415: 118151. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118151.

17. Wada K., Senshu H., Matsui T. Numerical Simulation of Impact Cratering on Granular Material. Icarus. 2006; 180(2): 528-545. – DOI: 10.1016/j.icarus.2005.10.029.

18. Ghazi Alshanti W. Discrete Element Modeling of a Projectile Impacting and Penetrating into Granular Systems. Ballistics. 2019; 1: 345-356. – DOI: 10.5772/intechopen.75550.

19. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. The Influence of Gravity on Granular Impacts: I. A DEM Code Performance Comparison. Powder Technology. 2021; 377: 910-919. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.043.

20. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. The Influence of Gravity on Granular Impacts: II. A Gravity-Scaled Collision Model for Slow Interactions. Physical Review E. 2022; 105(4): 044901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.105.044901.

21. Ye X., Zhang C. Impact Granular Media for Intruders with Different Geometries: Force and Rheology. Journal of Fluid Mechanics. 2023; 958: A34. – DOI: 10.1017/jfm.2023.98.

22. Wang F., Zhang H., Li X., Chen J., Liu Y., Yang K. A Drag Force Model of Vertical Penetration into a Granular Medium Based on DEM Simulations and Experiments. Acta Mechanica Sinica. 2024; 40(1): 123156. – DOI: 10.1007/s10409-023-23156-x.

23. Alshanti W.G., Wu Y. Numerical Simulation of Vertical Penetration into Granular Beds. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011; 5(1): 182-188.

24. Бухтояров Л. Д. Лысыч М. Н., Малюков С. В. Моделирование взаимодействия почвы с комбинированным орудием – ножевой каток и пара дисковых плугов. Лесотехнический журнал. 2025; 3 (59): 186-200. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12.

References

1. Mohan M. et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. Remote Sens. 2021, 13: 1-30. – DOI: https://doi.org/10.3390/rs13132596.

2. Prikaz Ministerstva prirodny`x resursov i e`kologii Rossijskoj Federacii ot 04.12.2020 № 1014 «Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya. sostava proekta lesovosstanovleniya. poryadka razrabotki proekta lesovosstanovleniya i vneseniya v nego izmenenij»: zaregistrirovano v Min-ve yusticii RF ot 18.12.2020 g., № 61556. [Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation 04.12.2020 No. 1014 "On approval of the Rules for reforestation, the composition of the reforestation project, the procedure for developing a reforestation project and amending it": registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation 18.12.2020, No. 61556]. (In Russ.).

3. Kalyashov V. A., Do T.A., Xitrov E. G., Grigoreva O. I., Gurev A.Yu., Novgorodov D.V. Sovremennye sistemy mashin i texnologii zagotovki drevesiny i lesovosstanovleniya v usloviyax gornyx lesosek. [Modern machine systems and technologies for timber harvesting and reforestation in mountain logging areas]. Resources and Technology. 2022 19: 1-47. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163.

4. Lysych M.N., Chernyshev V.V., Nagaytsev V.M. *Design and Simulation of Seed Metering Device for Aerosowing of Forest Pelleted Seeds.* J. Phys. Conf. Ser. 2021; 2032: 1-7. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012062.

5. Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Druchinin D.Y. *Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs.* Inventions. 2021; 83: 1-26. – DOI: https://doi.org/10.3390/inventions6040083.

6. Hou M., Peng Z., Liu R., Liu K., Li J., Li H. *Projectile Impact and Penetration in Loose Granular Bed. Science and Technology of Advanced Materials.* 2005; 6(7): 855-859. – DOI: 10.1088/1468-6996/6/7A08.

7. Ye X., Van Der Meer D. *Hydrogel Sphere Impact Cratering, Spreading and Bouncing on Granular Media.* Granular Matter. 2021; 23(4): 80. – DOI: 10.1007/s10035-021-01139-w.

8. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen H., Liu R., Zhao T. *Dynamic Characteristics of Sphere Impact into Wet Granular Materials Considering Suction*. Powder Technology. 2023; 415: 118147. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118147.

9. Zhang X., Wang C., Li H., Yang J., Zhou W., Liu Y. *The Force and Dynamic Response of Low-Velocity Projectile Impact into 3d Dense Wet Granular Media.* Physical Review E. 2024; 109(2): 024901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.109.024901.

10. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen X., Liu M. *Resistance Force Scaling and the Solution for Penetration Depth of Impacting Wet Granular Materials.* Journal of Fluid Mechanics. 2025; 987: 45. – DOI: 10.1007/s40571-024-00867-z.

11. Carvalho D.D., Bertho Y., Franklin E. *Penetration of a Spinning Sphere Impacting a Granular Medium.* Physical Review E. 2024; 110(1): 014902. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.014902.

12. Ye X., Zhao T., Wang H., Liu K., Zhang R., Chen L. *Projectile Oblique Impact on Granular Media: Penetration Depth and Dynamic Process.* Powder Technology. 2021; 378: 144-152. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.065.

13. Shen W., Zhang J., Liu K., Wang X., Li M., Yang H. *Influence of Inter-Particle Friction and Damping on the Dynamics of Spherical Projectile Impacting Onto a Soil Bed*. Journal of Terramechanics. 2022; 101: 35-45. – DOI: 10.1016/j.jterra.2022.03.002.

14. Liang S., Xu Y., Wang J. On *Energy Transfer and Dissipation of Intruder Impacting Granular Materials based on Discrete Element Simulations.* Granular Matter. 2022; 24(3): 88. – DOI: 10.1007/s10035-022-01254-2.

15. Zhang X., Wang Y., Li J., Chen H., Liu R., Zhao T. *The effect of particle shape on the dynamics of spherical projectile impacting into granular media.* Physical Review E. 2024; 110(3): 034901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.034901.

16. Lin J., Zhao T., Jiang M. *Investigating Projectile Penetration into Immersed Granular Beds Via CFD-DEM Coupling.* Powder Technology. 2023; 415: 118151. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118151.

17. Wada K., Senshu H., Matsui T. *Numerical Simulation of Impact Cratering on Granular Material.* Icarus. 2006; 180(2): 528-545. – DOI: 10.1016/j.icarus.2005.10.029.

18. Ghazi Alshanti W. *Discrete Element Modeling of a Projectile Impacting and Penetrating into Granular Systems.* Ballistics. 2019; 1: 345-356. – DOI: 10.5772/intechopen.75550.

19. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. *The Influence of Gravity on Granular Impacts: I. A DEM Code Performance Comparison.* Powder Technology. 2021; 377: 910-919. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.043.

20. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. *The Influence of Gravity on Granular Impacts: II. A Gravity-Scaled Collision Model for Slow Interactions.* Physical Review E. 2022; 105(4): 044901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.105.044901.

21. Ye X., Zhang C. *Impact Granular Media for Intruders with Different Geometries: Force and Rheology*. Journal of Fluid Mechanics. 2023; 958: A34. – DOI: 10.1017/jfm.2023.98.

22. Wang F., Zhang H., Li X., Chen J., Liu Y., Yang K. *A Drag Force Model of Vertical Penetration into a Granular Medium Based on DEM Simulations and Experiments*. Acta Mechanica Sinica. 2024; 40(1): 123156. – DOI: 10.1007/s10409-023-23156-x.

23. Alshanti W.G., Wu Y. *Numerical Simulation of Vertical Penetration into Granular Beds. Australian Journal of Basic and Applied Sciences.* 2011; 5(1): 182-188.

24. Bukhtoyarov L.D., Lysych M.N., Malyukov S.V. Modelirovaniye vzaimodeystviya pochvy c kombinirovannym orudiyem – nozhevoy katok i para diskovykh plugov. [Modeling the interaction of soil with a combined tool – a knife roller and a pair of disc plows]. Lesotekhnicheskiy zhurnal = Forestry Engineering journal. 2025; 3: 197-199. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12.

Сведения об авторах

✉ *Лысыч Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https:/ 0000-0002-3764-3873, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Бухтояров Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7428-0821, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Гнусов Максим Александрович – доктор технических наук, зав. кафедрой Безопасности жизнедеятельности и правовых отношений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1653-4595, e-mail: mgnusov@ya.ru.

Дручинин Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2128-2687, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

Мартыновский Евгений Викторович – инженер инжинирингового центра, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0434-575X, e-mail: profootballjack@gmail.com.

Брындина Лариса Васильевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-2345-6789, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Mikhail N. Lysych* – Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, https://orcid.org/0000-0002-3764-3873, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Leonid D. Bukhtoyarov – Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7428-0821, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Maksim A. Gnusov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Life Safety and Legal Relations, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, https://orcid.org/0000-0003-1653-4595, e-mail: mgnusov@ya.ru. Mikhail N.

Denis Yu. Druchinin – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2128-2687, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

Evgeniy V. Martynovsky – Engineer of the Engineering Center, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0434-575X, e-mail: profootballjack@gmail.com.

Larisa V. Bryndina – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-2345-6789, e-mail: bryndinv@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/24
УДК 630* 674.055:621.9.06

Влияние геометрических параметров режущего инструмента на показатели точности при пилении ленточными пилами

А. Стародубов[1], alexoldoak@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9735-7696
А. Платонов[1], aleksey66@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5941-6287
Лариса В. Брындина[1], bryndinv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-2345-6789

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Повышение точности пиления на ленточнопильных станках является важной задачей для лесопильной промышленности, особенно для малых и средних предприятий. Волнистость пропила приводит к значительным потерям древесины при последующей механической обработке, которые могут в несколько раз превышать потери от ширины пропила. Существующие стандарты не учитывают данный параметр, что обуславливает необходимость разработки новых технических решений. Цель -повышение точности процесса пиления и снижение волнистости пропила при раскрое круглых лесоматериалов путем оптимизации геометрических параметров зубьев ленточной пилы. Проведено экспериментальное исследование влияния геометрии зубьев ленточной пилы на точность распиловки сосновых бревен на горизонтальном ленточнопильном станке «Спектр 70». Разработана конструкция экспериментальной пилы с оптимизированным профилем зубьев. Установлено, что величина волнистости возрастает по мере продвижения пропила в бревне и при затуплении инструмента. Применение экспериментальной пилы позволяет снизить волнистость пропила на 7-10% и уменьшить потери древесины при последующей обработке. Результаты работы могут быть использованы для повышения эффективности раскроя пиловочного сырья на малогабаритном лесопильном оборудовании.

Ключевые слова: *ленточнопильный станок, параметры ленточной пилы, волнистость пропила, качество пиломатериалов, пропил, раскрой лесоматериалов*

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Стародубов А.С. Влияние геометрических параметров режущего инструмента на показатели точности при пилении ленточными пилами / А.С. Стародубов, А.Д. Платонов, Л.В. Брындина // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 405–420. – *Библиогр.: с. 417-419 (23 назв.)*. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/24.

Поступила 30.05.2025. ***Пересмотрена*** 15.11.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

The influence of geometric parameters of the cutting tool on the accuracy indicators when sawing with band saws

A. Starodubov[1], alexoldoak@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9735-7696
A. Platonov[1], ✉ aleksey66@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5941-6287
Larisa V. Bryndina[1], bryndinv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-2345-6789

[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

Improving sawing accuracy on band saw machines is an important task for the sawmill industry, especially for small and medium-sized enterprises. Kerf waviness leads to significant wood losses during subsequent mechanical processing, which can be several times higher than the losses from the kerf width itself. Current standards do not account for this parameter, which necessitates the development of new technical solutions. To improve the accuracy of the sawing process and reduce kerf waviness when cutting round timber by optimizing the geometric parameters of the band saw teeth. An experimental study was conducted on the influence of band saw tooth geometry on the sawing accuracy of pine logs using the "Spectr 70" horizontal band saw machine. A design of an experimental saw with an optimized tooth profile was developed. It was found that the degree of waviness increases as the cut progresses through the log and as the tool becomes dull. The use of the experimental saw reduces kerf waviness by 7-10% and decreases wood losses during subsequent processing. The results of the work can be used to improve the efficiency of sawlog processing on small-sized sawmill equipment.

Keywords: *band saw, band saw parameters, undulation of the cut, quality of lumber, cutting, cutting of timber*

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Starodubov A.S., Platonov A.D., Bryndina L.V. (2025). The influence of geometric parameters of the cutting tool on the accuracy indicators when sawing with band saws. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 405–420 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/24.

Received 30.05.2025. ***Revised*** 15.11.025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Актуальность темы обусловлена повсеместным распространением ленточнопильного оборудования в лесопилении и деревообработке. Особенно остро вопрос точности и качества распила стоит перед малыми и средними предприятиями, для которых каждая единица продукции напрямую влияет на экономическую эффективность. В отличие от циркулярных пил, ленточные пилы обладают рядом преимуществ, таких как малая ширина пропила и высокая производительность при работе с крупными заготовками. Однако эти преимущества могут быть нивелированы такими дефектами, как волнистость поверхности распила, вызванными несовершенством геометрических параметров инструмента и его подготовки.

Ключевой проблемой, с которой сталкиваются операторы, является неустойчивость пилы в пропиле, приводящая к образованию «волны» на поверхности пиломатериала.

Исследования показывают, что более 90% случаев возникновения волны связаны с некачественной разводкой зубьев, а еще 5% – с заточкой. Это доказывает, что геометрия пилы – не теоретический параметр, а прямой фактор, влияющий на рентабельность производства.

Степень научной разработанности проблемы достаточно высока. Ведущие производители, такие как Wood-Mizer, много лет инвестируют в исследования оптимальной геометрии пильного полотна, разрабатывая специализированные профили зубьев для различных пород древесины [1].

В научной и отраслевой литературе подробно описаны основные геометрические параметры: передний и задний углы, шаг зуба, высота зуба и радиус в его основании, а также развод – и их влияние на процесс резания. Существуют конкретные рекомендации по выбору углов заточки в зависимости от твердости обрабатываемой древесины.

Одним из основных преимуществ малогабаритных горизонтальных ленточнопильных станков перед лесопильными рамами является обеспечение узкого пропила благодаря тонкой ленточной пиле. Но на основе предварительных исследований толщины выпиливаемых досок установлено, что пропил имеет значительную волнистость по длине пиломатериала. Непрямолинейность траектории движения ленточной пилы в процессе пиления обусловлена влиянием ряда факторов, определяемых динамической системой «станок-инструмент-заготовка» (СИЗ) [2, 21]. Непрямолинейность или волнистость пропила может приводить и к значительной разнотолщинности досок, тем самым к увеличению потерь древесины при последующей операции механической обработки. В связи с чем, снижение волнистости и разнотолщинности пиломатериалов при раскрое бревен является актуальной задачей.

Волнистость древесины представляет собой явление, при котором на поверхности материала наблюдаются периодические изменения толщины распила. Это явление связано с колебаниями инструмента, используемого для резки, и может значительно повлиять на качество конечного продукта. Волнистость определяется как результат взаимодействия механических и технологических факторов, которые приводят к неравномерности обработки материала.

В основе механизма образования волнистости в процессе пиления древесины является вибрация ленточной пилы. Вибрации могут быть вызваны неравномерным распределением нагрузки на инструмент, а также дефектами в конструкции оборудования. Колебания создают периодические изменения в траектории движения пилы, что и приводит к образованию волнистости на поверхности древесины. Изменение траектории пилы в пропиле зависит и от усилия натяжения полотна пилы на что указывают [6,13], а также конструкции привода ленточной пилы, на что указывается в работе. [17].

В работе [5] повышение работоспособность ленточной пилы достигается за счет равномерного распределения компенсирующих напряжений в материале инструмента по всему массиву миниполосового участка, за счет формирования однородного поля внутренних остаточных компенсирующих напряжений в полотне ленточной пилы теплофизическим методом.

Параметры распиловки, такие как скорость, угол и глубина реза, взаимно влияют на процесс формирования волнистости, сочетание высокой скорости резания с оптимальным углом может значительно улучшить качество поверхности древесины. При этом недостаточная толщина срезаемого слоя может снизить эффективность процесса резания.

Скорость резания является одним из ключевых параметров, влияющих на образование волнистости. При увеличении скорости резания от 15 до 60 м/с, можно достичь более ровного распила. Однако чрезмерное увеличение скорости может привести к перегреву пилы, что негативно сказывается на качестве резания. Таким образом, выбор подходящей скорости является важным аспектом минимизации волнистости. Эти данные хорошо согласуются с исследованиями, представленными в работах [6,8 ,22].

Глубина срезаемого слоя влияет на распределение напряжений в древесине во время распиловки, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на образование волнистости. Однако, увеличение глубины реза повышает вероятность возникновения внутренних напряжений, способных вызвать деформацию поверхности.

Большое влияние на величину волнистости оказывает плотность древесины. В работе [8] отмечено, что при резании мягкой древесины возникают более сложные явления по сравнению с резанием более плотной. Это связано с более интенсивным трением полотна пилы в пропиле и резца о стружку и древесину. Ширина пилы обеспечивает оптимальный баланс между гибкостью и её устойчивостью в пропиле. Использование более широких пил предпочтительно для распиловки бревен из твёрдых пород древесины, а менее широких – для мягкой древесины.

Свойства древесины, такие как плотность и влажность, имеют значительное влияние на процесс распиловки и могут способствовать образованию волнистости. Породы древесины с высокой плотностью, больше подвержены этому явлению. Это объясняется тем, что такие материалы создают повышенное сопротивление инструменту, что, в свою очередь, усиливает вибрации и колебания пилы. Качество выпиливаемых пиломатериалов зависит и от размерных характеристик сырья. Рациональный выбор схемы раскроя бревна позволяет минимизировать влияние вибраций на качество конечного продукта. В работах [3,11], Табенкин, А.Н. [17], показано, что плотность распиливаемой древесины и сила резания оказывают влияние и на шероховатость пиломатериалов.

Точность раскроя является основным показателем качества работы ленточной пилы. Форма зубьев пилы при этом имеет определяющую роль. Форма ленточной пилы, включая профиль её зубьев, оказывает значительное влияние на качество обработки древесины. Это особенно важно при распиловке древесины мягких пород. По данным исследований [14,17], форма зубьев пилы оказывает влияние на глубину пропила и угол атаки, что также сказывается на конечном результате обработки. Установлено, что качество процесса резания и оптимальность выбранного режима на ленточно-отрезном станке наиболее точно характеризуется получаемой в результате пиления стружкой.

Форма зубьев пилы способствует высокой точности распиловки, что особенно актуально в условиях промышленного производства и поиск рациональной формы и геометрических параметров зубьев является актуальным направлением исследований [9, 12].

Процесс резания древесины также зависит от геометрии режущего инструмента, что показано в работах [8, 10]. Важно учитывать, что в процессе пиления ленточными пилами с зубьями из различных материалов и с различной геометрией схема сил резания и деформаций полотна отличается. По мнению авторов [6,9] именно это позволяет достичь оптимальных значений стойкости инструмента.

Конструкция с выпуклым профилем зубьев, отличающаяся, как угловыми параметрами, так и формой впадины с увеличенным радиусом изгиба, способствует эффективному удержанию и сжатию опилок в пропиле, делая ее наиболее подходящей для обработки древесины мягких хвойных пород отмечено в работах [7,14].

Обработка указанных форм зубьев выполняется с использованием автоматизированных станков, предназначенных для заточки ленточных пил. В процессе заточки, важно уделять внимание соответствию профиля и толщины точильного диска в зависимости от параметров зубьев, особенно для зубьев с выпуклой формой (рис. 1б).

В большинстве случаев используют конфигурации зубьев для ленточных пил, которые представлены на рис.1.

Кроме того, правильный выбор формы зубьев позволяет адаптировать пилу под различные задачи, такие как продольное или поперечное пиление. В проектировании ленточных пил с ребристыми зубьями уделяют внимание увеличению переднего угла зуба γ, так как данный параметр существенно влияет на эффективность процесса пиления.

Большой передний угол уменьшает силу, необходимую для проведения процесса резания. Это облегчает тем самым работу резания на пилах малой толщины, что критично для обеспечения их долговечности. Кроме того, такое конструктивное решение минимизирует горизонтальные нагрузки на пилу, предотвращая ее смещение или соскальзывание со шкивов в процессе эксплуатации.

Вместе с тем, увеличение переднего угла γ необходимо координировать с характеристиками обрабатываемой древесины и существующими стандартами на прочность режущего элемента. Эта прочность определяется соответствием габаритов режущего элемента и угла заострения *β*. Угол заострения зубьев ленточных пил необходимо поддерживать в диапазоне от 40 до 55 градусов, что напрямую зависит от величины твердости распиливаемой древесины. В табл. 1 представлены значения углов заострения для зубьев, зависящие от технологических характеристик обрабатываемой древесины.

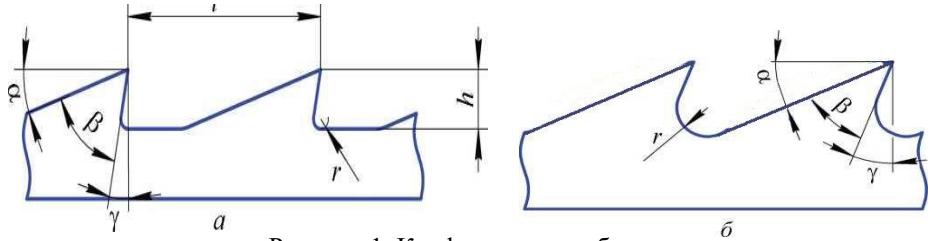


Рисунок 1. Конфигурации зубьев ленточных пил:
а - зуб типовой пилы; *б* - зуб экспериментальной пилы
Figure 1. Configurations of band saw teeth:
a - typical saw tooth; b - experimental saw tooth
URL: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Угол заточки зубьев ленточной пилы имеет ключевое значение для обеспечения качественного распила, поскольку неправильный угол может привести к увеличению отходов древесины, снижению точности обработки и ухудшению общего качества пилопродукции. Правильный выбор угла заточки зубьев пил может существенно повысить качество процесса пиления за счет уменьшения износа инструмента. Эти выводы подтверждаются данными отраслевых исследований C. Donner (2019) [19].

Таблица 1

Угловые параметры профилей зубьев для полотен ленточных пил

Table 1

Angular parameters of tooth profiles for band saw blades

Тип зубьев пилы Saw tooth type	Передний угол, *γ* Front angle, γ	Угол заострения, *β* Angle of sharpening, β	Задний угол, α Back angle, α	Угол резания, *δ* Cutting angle, δ	Область применения Scope of application

Прямой Direct	20-15	50-55	20	70-75	Для древесины твердых пород и мерзлой или сучковатой древесины For hardwood and frozen or knotty wood
С выпуклостью With a bulge	30	40	20	60	Для древесины мягких (хвойных) пород For softwood (coniferous)

Анализ влияния углов заточки на точность распила показал, что этот параметр определяет не только качество обработки, но и производительность пиления, как показано в работах [10,16]. Повышение угла заточки увеличивает силу резания, что, в свою очередь, вызывает отклонение от заданных размеров пиломатериалов. При малых углах заточки уменьшается сопротивление материала, что способствует более плавному резанию, но при этом увеличивается износ режущей кромки. Напротив, большие углы заточки обеспечивают более устойчивую геометрию зубьев, но требуют большей силы резания. Следовательно, выбор угла заточки является компромиссом между точностью, долговечностью инструмента и усилием резания. В работе Прокофьева Г.Ф., Коваленко О.Л. (2023) [23] отмечается, что для продолжительной и надежной эксплуатации ленточных пил необходима их регулярная заточка не только для обеспечения требуемой остроты зубьев, но и для обточки межзубовых впадин с целью удаления дефектного слоя, образующегося из-за усталостных явлений.

Угол резания также оказывает существенно влияние на процесс образования волнистости. При недостаточно малом угле реза возрастает риск деформации древесины, в то время как чрезмерный угол может увеличить волнистость, а также образование разрывов и неровностей на поверхности пиломатериалов, особенно мягких древесных пород , о чем отмечено в работе [22].

Согласно действующим стандартам, качество пиломатериалов оценивают по показателям шероховатости поверхности и разнотолщинности. В этих стандартах не предусмотрены критерии оценки погрешности толщины досок вследствие волнистости пропила, поскольку они были разработаны для технологии распиловки бревен на лесопильных рамах. Однако, на практике при распиловке лесоматериалов на ленточнопильных станках необходимо дополнительно осуществлять контроль и оценку геометрических размеров выпиливаемых пиломатериалов по величине их волнистости. Данный показатель является основным для определения номинальной толщины пиломатериалов.

Исследование факторов, влияющих на образование волнистости древесины при распиловке ленточными пилами, а также анализ методов её минимизации, позволит разработать рекомендации для повышения качества древесной продукции. Таким образом, представляется целесообразным провести исследование технологической точности распиловки бревен ленточной пилой на горизонтальном ленточнопильном станке, с целью определения критериев оценки волнистости поверхностей досок и основных факторов влияния на прямолинейность пропила.

Стандартизация форм зубьев, предусмотренная отраслевыми нормами, обеспечивает универсальность применения пил и их совместимость с различными станками, что повышает эффективность деревообрабатывающих процессов. Рациональное сочетание ширины и формы ленточной пилы является важным фактором для достижения высокой точности и качества распила. Использование пил с подходящей шириной и формой зубьев позволяет снизить энергозатраты на пиление до 15 %, а также уменьшить износ инструмента, как указывается в работе [15].

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на малогабаритном горизонтальном ленточнопильном станке модели «Спектр 70» производства ООО «Спектр» (Российская Федерация), представленном на рисунке 2.

Конфигурация режущего инструмента для обработки древесины соответствовала требованиям ГОСТ 6232-77.

Анализ волнистости поверхности пиломатериалов осуществлялся на выборке досок, полученных в результате продольной распиловки сосновых бревен длиной 3,0 м со средним диаметром 31±1 см. Сравнительные испытания проводились с применением двух типов ленточных пил: серийного образца марки Banholzer и экспериментального инструмента.

Параметры контрольного пильного полотна составляли:

37. геометрические размеры: 5300×35×1,2 мм;
38. кинематические характеристики: шаг зубьев 7,8 мм;
39. геометрия режущей кромки: угол заострения β=53°, передний угол γ=15°, задний угол α=22°;
40. параметры разводки: поочередный развод зубьев на величину 0,6 мм.

Экспериментальный образец пилы, конструкция которого защищена патентом РФ № 2817850, демонстрирует повышенные технологические характеристики при обработке древесины, обеспечивая соответствие качества пилопродукции нормативным требованиям ГОСТ 24454-80 и ГОСТ 2695-83. Визуальное представление экспериментального инструмента приведено на рисунке 3.



Рисунок 2. Выпиловка пиломатериалов на горизонтальном ленточнопильном станке «Спектр 70»
Figure 2. Sawing lumber on the horizontal band saw machine "Spectr 70"
URL: Собственное фото авторов
Source: Authors' own photo

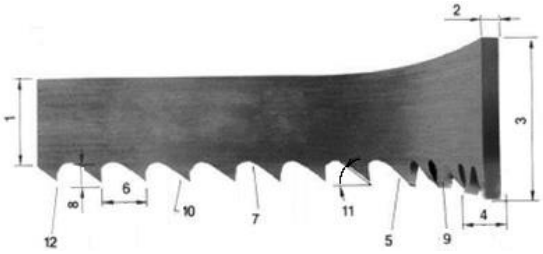


Рисунок 3. Конструктивные и геометрические характеристики экспериментальной ленточной пилы: 1 –ширина полотна пилы без учета высоты зуба; 2 - толщина полотна пилы; 3 - ширина пилы с учетом высоты зуба; 4 - развод зубьев пилы; 5 - высота зуба пилы; 6 - шаг зубьев; 7 - радиус кривизны основания канавки; 8 - расстояние от вершины зуба до дна канавки; 9 - передняя поверхность зуба; 10 - задняя поверхность зуба; 11 - задний угол зуба; 12 - передний угол зуба
Figure 3. Design and geometric characteristics of the experimental band saw: 1 - saw blade width excluding tooth height; 2 - saw blade thickness; 3 - saw width taking into account tooth height; 4 - saw tooth set; 5 - saw tooth height; 6 - tooth pitch; 7 - groove base curvature radius; 8- distance from tooth top to groove bottom; 9 - tooth front surface; 10 - tooth back surface; 11 - tooth back angle; 12 - tooth front angle
URL: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

Полотно экспериментальной ленточной пилы имело параметры: длина 5300 мм, ширина 35,5 мм (поз. 3), ширина без учета высоты зубьев 28 мм (поз. 1), толщина полотна 1 мм (поз. 2), шаг зубьев 7,39 мм (поз. 6), с разводом зубьев на сторону 0,6 мм (поз. 4), количество зубьев на один дюйм длины полотна пилы 7 шт., радиус кривизны основания канавки 5,3 мм (поз. 7), расстояние от вершины зуба до дна канавки 7 мм (поз. 8). Экспериментальный вариант конструкции ленточной пилы имел, чередующиеся основные зубья (2), выполненные прямозаточенными, и подрезные зубья (3), являющиеся сглаживающими и выполненные косозаточенными. Разность высот между основными и подрезными зубьями составляет 0,5 мм. Между основными и подрезными зубьями расположены направляющие зубья (4), высота которых равна высоте основных зубьев. Направляющие зубья выступают за пределы наружного контура ленточной пилы на величину упругого восстановления волокон древесины, равную 0,1-0,2 мм, и имеют угол бокового радиального поднутрения 40 мин. Зубья с переменным шагом развода способствуют уменьшению вибраций, что делает распил более гладким и точным. Конфигурация параметров зубьев экспериментальной пилы: высота зубьев 7,22 мм (поз. 5), передний угол $\gamma = 14°$ (поз. 12), угол заострения $\beta = 40°$, задний угол $\alpha = 36°$ (поз. 11), передняя поверхность зуба 0,6° (поз. 9), задняя поверхность зуба 0,6° (поз. 11). Скорость подачи суппорта для двух вариантов пилы составила: начальная – 0,8 м/мин, рабочая – 2,2 м/ мин, скорость резания составила 35 м/с. Раскрой бревен производили острой пилой. Исследования волнистости поверхности пиломатериалов проводили на партии досок, выпиленных из сосновых бревен длиной 3,0 м и диаметром 30-32 см. Схема раскроя бревен представлена на рис. 4.

Толщина слоя b' соответствует максимальной высоте неровностей (волн) пропила. Согласно [5], для оценки точности толщины распила измеряют толщину доски в нескольких точках (рис.6). Таким способом нельзя установить величину погрешности формы пропила, поскольку результат включает в себя высоту неравенств двух смежных пропилов (рис. 6, а).

Следовательно, нужно ввести новый показатель точности, который позволил бы определять величину кривизны пропила и был простым для измерения в производственных условиях.

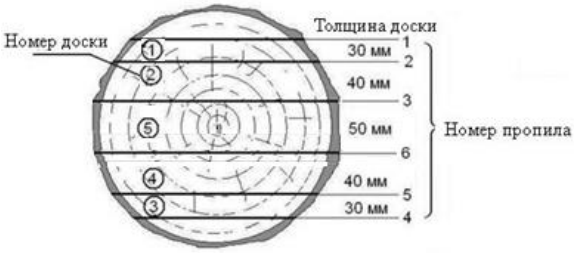


Рисунок 4. Схема раскроя бревна

Figure 4. Log cutting diagram

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ результатов предварительных исследований качества распиловки бревен экспериментальной ленточной пилой на горизонтальных ленточнопильных станках [1] показал, что с учетом скорости подачи суппорта, породы, температуры окружающей среды, силы натяжения пильной ленты, угла подачи и др., изменяющихся при распиловке, образуется пропил криволинейной волнообразной формы. Криволинейность пропила (рис.5) приводит к потерям древесины при последующей механической обработке. Величина этих потерь будет складываться из толщины пропила b и величины волны (толщина слоя b').

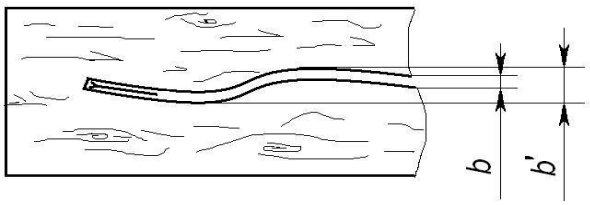


Рисунок 5. Форма кривизны пропила по длине доски

Figure 5. The shape of the curvature of the cut along the length of the board

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для оценки кривизны пропила следует измерять высоту волн одного пропила. На практике это проще всего выполнить способом измерения глубины впадин относительно некоторой прямой, касающейся наивысших точек поверхности пропила (рис. 7).

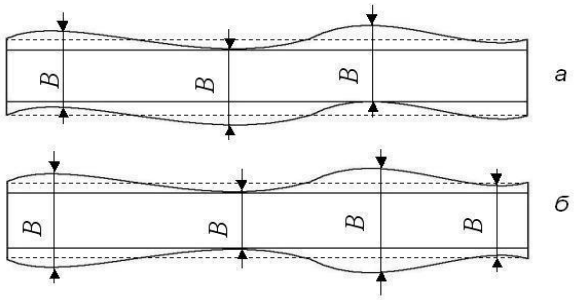


Рисунок 6. Оценка кривизны пропила путём измерения толщины

Figure 6. Estimation of the curvature of the cut by measuring the thickness

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

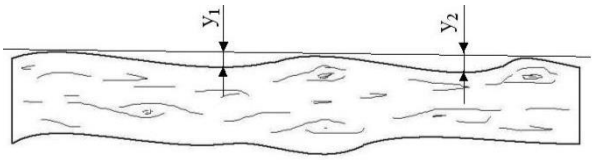


Рисунок 7. Способ измерения волнистости поверхности доски

Figure 7. Method for measuring the waviness of the board surface

URL: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для этого доску необходимо поместить на ровную плоскость, приложить к поверхности доски проверочный брусок или линейку и замерить величину зазоров с помощью штангенциркуля или щупов. В работе измерение волнистости производили при помощи индикатора часового типа, закрепленного на стойке. Замеры производили в начале доски и далее через каждые 0,5 м. Поскольку один пропил формирует поверхности двух смежных досок, то глубина впадин на одной доске будет равна высоте соответствующих гребней волн на другой доске. Поскольку поверхность доски имеет отклонение от прямолинейности, то показатель кривизны пропила, в этом случае, по сути и является волнистостью. Следовательно, волнистость – это показатель точности выпиловки досок, характеризующий величину погрешности обработанной поверхности доски вследствие кривизны пропила.

Для практической оценки точности пропила предлагается ввести два отдельных критерия: средняя и максимальная волнистость. Средняя волнистость $y_{ср}$ характеризует общую кривизну пропила и определяется как среднее арифметическое значение всех точек измерения

$$y_{\text{ср}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i \qquad (1)$$

где N – количество замеров на одном пропиле

(или на одной стороне доски), что соответствует

числу волн по длине доски, шт;

y_i – результат i-го измерения волнистости, мм.

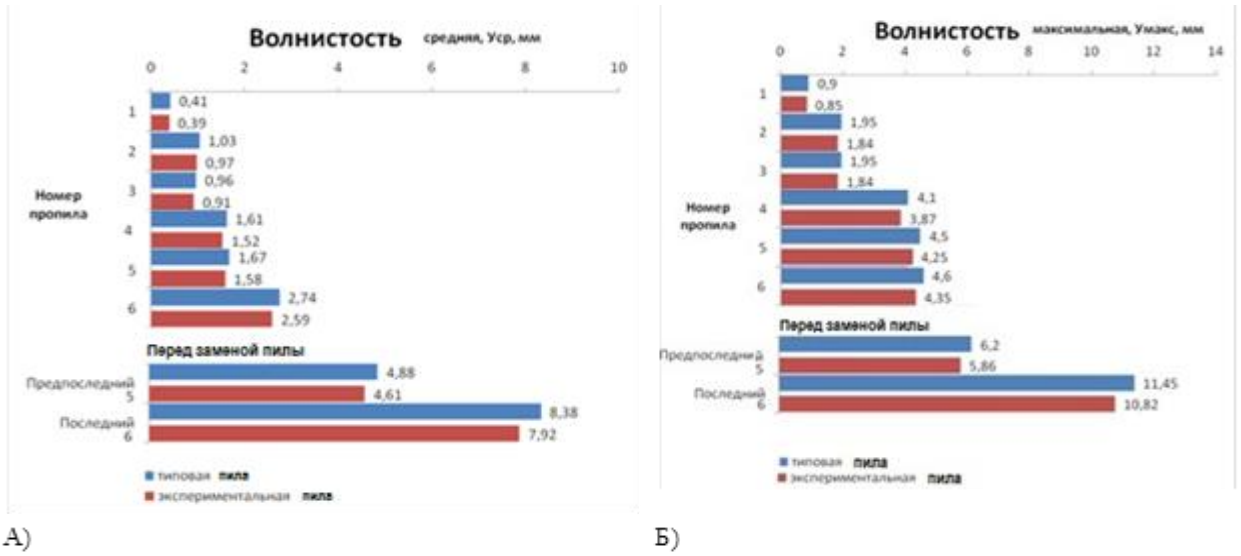
Потери древесины при пилении на ленточнопильных станках будут определяться не только шириной самого пропила b (рис. 5), но и величиной максимальной волнистости, определяемой выражением:

$$b' = b + y_{макс}. \qquad (2)$$

Следовательно, максимальная волнистость $y_{макс}$ является одним из показателей оценки потерь древесины при исправлении неровностей поверхностей двух смежных пиломатериалов на последующих стадиях механической обработки.

Реззультаты

Результаты измерения средней величины волнистости пропила приведены на рис. 8. Для анализа общей динамики величины волнистости пропила приведены также результаты замеров двух последних пропилов в конце периода стойкости пилы. Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что с увеличением времени наработки инструмента наблюдается увеличение как средней, так и максимальной волнистости. Больших значений волнистость достигает при пилении на последнем и предпоследнем пропилах, особенно затупленной пилой.



А) Б)

Рисунок 8. Волнистость пропила средняя (а) и максимальная (б)
Figure 8. Average (a) and maximum (b) waviness of the cut
URL: собственная композиция авторов
Source: author's composition
Рисунок 8. Волнистость пропила средняя (а) и максимальная (б)

Несколько меньшее, но существенное влияние на величину и характер волнистости (рис. 6 и 7) оказывает также размещение пропила в бревне относительно ее центра.

На основании результатов исследований были определены потери древесины с учетом волнистости пропила при выпиловке пиломатериалов из бревен диаметром 28-30 см, представленные в табл.4.Суммарные потери древесины от величины пропила и его волнистости *δ, %* определены по формуле:

$$\delta = \frac{y_{макс} + b}{B'} 100, \quad (3)$$

где b – ширина пропила, мм;

B' – толщина доски с учетом волнистости пропила, равная

$$B' = B + y_{макс}, \quad (4)$$

где B – номинальная толщина доски, мм.

На основании результатов исследований были определены потери древесины с учетом волнистости пропила при выпиловке пиломатериалов из бревен диаметром 28-30 см, представленные в табл.4.Суммарные потери древесины от величины пропила и его волнистости *δ, %* определены по формуле:

$$\delta = \frac{y_{макс} + b}{B'} 100, \quad (3)$$

где b – ширина пропила, мм;

B' – толщина доски с учетом волнистости пропила, равная

$$B' = B + y_{макс}, \quad (4)$$

где B – номинальная толщина доски, мм.

Анализ полученных результатов, представленных на рис. 8 и в табл. 4 показывает, что потери древесины в пропиле за счет волнистости могут многократно превышать потери от величины пропила, особенно в конце процесса раскроя бревен. Наименьшая волнистость пропила отмечена на первом пропиле. В начале процесса раскроя бревно имеет высокую жесткость, обусловленную круглой формой бревна. По мере выпиловки пиломатериалов ширина пропила возрастает,

а жесткость бревна понижается. Это приводит к увеличению волнистости пропила более чем в 2 раза. После раскроя половины диаметра бревна, его переворачивают на 180 градусов и продолжают раскрой. В этом случае жесткость бревна и его устойчивость в пропиле продолжают снижаться и величина волнистости возрастает примерно в 4-5 раз. Наибольшее увеличение волнистости пропила отмечено при выпиловке последних пиломатериалов. Здесь раскрою подвергается уже пластина, которая имеет меньшую жесткость по сравнению с первоначальной округлой формой бревна. Использование экспериментальной пилы с измененными параметрами позволяет уменьшить величину волнистости пропила. Снижение максимальной волнистости пропила в начале раскроя бревна острой пилой составляет в среднем 0,05-0,12 мм или 5,61 %, по сравнению с базовой пилой. Величина волнистости пропила в конце раскроя бревна, т.е. после его поворота на 180 градусов составляет 3,87-4,35 мм. Это на 5,5 % меньше по сравнению с базовой пилой.

Затупление типовой пилы повышает величину волнистости пропила в начале раскроя в 2,18 раза и в конце раскроя в 1,73 раза. При использовании затупленной экспериментальной пилы величина волнистости пропила в начале раскроя понижается на 7,2 % и на 6,1 % – в конце раскроя бревна по сравнению с типовой пилой.

На основании анализа результатов выполненных исследований можно классифицировать факторы, влияющие на величину волнистости пропила при распиловке бревен ленточной пилой с определеннымигеометрическими параметрами на горизонтальном ленточнопильном станке марки «Спектр 70» и дать им общую классификацию.

Точность и прямолинейность пропила при механической обработке древесины определяются комплексом технологических и эксплуатационных факторов. Ключевое значение имеют параметры режущего инструмента. Геометрия режущей кромки, включая остроту зубьев и углы заточки, непосредственно влияет на эффективность внедрения в материал и характер стружкообразования. Кинематические параметры зубьев, такие как шаг и равномерность разводки, определяют ширину пропила и эффективность удаления опилок. Натяжение полотна обеспечивает необходимую жесткость и демпфирование колебаний, минимизируя поперечные отклонения инструмента.

Таблица 4

Оценка величины волнистости и потерь древесины

Table 4

Evaluation of the amount of waviness and wood loss

Номер пропила Cut number	Волнистость максимальная		Величина потерь древесины в про	
	Типовая пила ГОСТ 24454-80 Standard saw GOST 24454-80	Экспериментальная пила Experimental saw	Типовая пила ГОСТ 24454-80 Standard saw GOST 24454-80	Экспериментальная пила Experimental saw
Острая пила / Sharp saw				
1	0,90	0,85	75,00	70,83
2	1,95	1,84	162,50	153,33
3	1,97	1,84	164,17	153,33
4	4,10	3,87	341,67	322,50
5	4,50	4,25	375,00	354,17
6	4,60	4,35	383,33	362,50
Затупленная пила / Dull saw				
1	2,13	1,93	177,50	160,80
2	4,10	3,80	341,67	316,67
3	4,34	4,07	361,67	339,17
4	5,13	4,73	427,50	394,17
5	6,20	5,86	516,67	488,33
6	11,45	10,82	954,17	901,67

Свойства обрабатываемого материала существенно влияют на процесс резания. Анизотропия и гетерогенность строения древесины проявляются в наличии макро- и микроструктурных неоднородностей. Свилеватость, крень, сучки, а также различная плотность ранней и поздней зон создают переменное сопротивление резанию. Физико-механические характеристики, включая

плотность, твердость и модуль упругости породы, определяют величину сил резания. Влажностный режим обрабатываемого материала влияет на его пластичность и склонность к деформациям.

Среди технологических факторов особое значение имеют режимы резания. Скорость подачи и частота вращения должны быть оптимизированы для минимизации деформаций инструмента и заготовки. Динамическая устойчивость системы "станок-приспособление-инструмент-заготовка" определяет уровень вибраций, непосредственно влияющих на качество обработки. Квалификация оператора остается критически важным фактором при работе с ручным и полустационарным оборудованием, поскольку определяет стабильность приложения усилия подачи.

Таким образом, проведенные исследования позволяют констатировать установленную количественную зависимость величины волнистости пропила от степени затупления режущего инструмента и положения пропила в обрабатываемой заготовке. Максимальные значения амплитуды колебаний наблюдаются при выполнении заключительных пропилов инструментом с критическим износом. Разработанная и апробированная усовершенствованная конструкция ленточной пилы с оптимизированными геометрическими параметрами зубьев демонстрирует устойчивое снижение величины волнистости пропила на 5,61-7,2% по сравнению со стандартным инструментом. Полученные результаты подтверждают доминирующее влияние волнистости пропила на объем технологических потерь древесины. Экспериментально доказана принципиальная возможность повышения эффективности раскроя пиловочного сырья на 5-10% за счет применения разработанной конструкции ленточной пилы. Предложенные технические решения могут быть успешно внедрены в производственных условиях для оптимизации технологических процессов лесопиления.

Заключение

На основании проведенного исследования влияния геометрических параметров ленточной пилы на точность пиления можно сформулировать следующие выводы:

1. Установлено, что волнистость пропила является ключевым параметром, определяющим точность распиловки на горизонтальных ленточнопильных станках. Экспериментально доказано, что величина волнистости возрастает по мере продвижения пропила в бревне: минимальные значения (0,85-0,90 мм) зафиксированы в начале раскроя, максимальные (4,35-4,60 мм) - в конце.
2. Разработана и апробирована методика оценки волнистости пропила, включающая раздельное определение средней и максимальной волнистости. Показано, что потери древесины за счет волнистости могут в 9-12 раз превышать потери от ширины пропила, особенно при использовании затупленного инструмента.
3. Обоснованы оптимальные геометрические параметры зубьев ленточной пилы для обработки мягких пород древесины: передний угол $\gamma = 14°$, угол заострения $\beta = 40°$, задний угол $\alpha = 36°$, переменный шаг зубьев 7,39 мм. Конструкция экспериментальной пилы с чередующимися основными и подрезными зубьями позволяет снизить величину волнистости на 7-10% по сравнению с типовыми пилами.
4. Классифицированы факторы, влияющие на точность пропила, с выделением трех основных групп: параметры режущего инструмента, свойства обрабатываемого материала и технологические условия процесса пиления. Установлено, что состояние режущего инструмента и порода древесины оказывают определяющее влияние на величину волнистости.
5. Практическая значимость работы заключается в разработке ресурсосберегающей технологии раскроя лесоматериалов, позволяющей снизить расход древесины при последующей механической обработке на 5-10%. Предложенная конструкция ленточной пилы может быть эффективно использована на различных типах ленточнопильных станков.

Список литературы

1. Band Saw Blades Market: Expansion Fueled by Rising Demand in Metal Cutting, Wood Processing, and Construction Industries. Global Insight Services (GIS). – 2025. – URL: https://linkewire.com/2025/11/20/band-saw-blades-market/
2. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M. Minor cutting edge angles of sawing teeth: Effect on cutting forces in wood. Eur. J. Wood Wood Prod. 2022;80:1165-1173. DOI: 10.1007/s00107-022-01833-3
3. Orlowski K.A., Chuchala D., Przybylinski T., Legutko S. Recovering evaluation of narrow-kerf teeth of mini sash gang saws. Materials. 2021;14(23):7459. DOI: 10.3390/ma14237459
4. Анализ рынка ленточных пил в России - 2025. Показатели и прогнозы. – М.: ТЕБИЗ, 2025. – 129 с. – URL: https://tebiz.ru/mi/rynok-lentochnykh-pil-v-rossii
5. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Сазанова Е.В., Пономарева Н.Г. Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 6(402). – С. 175-183. – DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-175-183
6. Orlowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Assessment of wear of the bandsaw teeth in industrial conditions. Acta Facultatis Xylologiae Zvolen. 2022;64(2):69-76. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.07
7. Repák R., Šušteršič M., Kavčič M. Impact of band saw blade thickness and width on cutting deviation in longitudinal sawing of oak wood. Drvna Industrija. 2023;74(3):257-266. DOI: 10.5552/drvind.2023.2245
8. Orlowski K.A., Chuchala D., Szczepanski M., Migda W., Wojnicz W. Lateral forces determine dimensional accuracy of the narrow-kerf sawing of wood. Sci. Rep. 2022; 12:86. DOI: 10.1038/s41598-021-04129-3
9. Erchinger F., Rapp C., Schuler T. Geometric optimization of band saw blades for improved dimensional accuracy in furniture wood processing. Procedia CIRP. 2023; 117:395-400. DOI: 10.1016/j.procir.2023.05.026
10. Scheidl J., Diebold J. Finite element modal analysis of moving bandsaw blades using incremental rod theory with consideration of the pre-stress distribution in the cross section. In: 95th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics: April 7th - 11th, 2025: Poznan (Poland): Book of Abstracts. 2025. p. 102
11. Dukić I., Merhar M., Jovanović J., Herceg D. Analysis of circular saw tooth marks profile on material machined surface after filtering with Fast Fourier Transform (FFT). Drvna Industrija. 2022;73(2):151-162. DOI: 10.5552/drvind.2022.0011
12. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M., Broman O. Minor cutting edge force contribution in wood band-sawing. J Wood Sci. 2022;68:18. DOI: 10.1186/s10086-022-02023-8
13. Orlowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Capacity of Surface Production of Band Sawing in Manufacture of Oak Floor Upper Layers. BioResources. 2023;18(2):2789-2799. DOI: 10.15376/biores.18.2.2789-2799
14. Baranski A., Prządka M., Węgrzyn R. Geometrical and technological factors affecting band saw cutting accuracy in furniture manufacturing. Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry. 2021;63(4):256-265. DOI: 10.2478/ffp-2021-0022
15. Očkaj T., Đurković I., Glavas M. Effect of band saw blade geometrical parameters on kerf quality and cutting accuracy in wood machining. Drvna Industrija. 2023;74(2):145-154. DOI: 10.5552/drvind.2023.2208
16. Klement P., Hlávková J., Bajzáth T. Influence of tooth geometry and blade width on the stability and accuracy of band sawing in hardwood. Wood Research. 2022;67(3):387-398. DOI: 10.37724/SR.2022.0029
17. Табенкин А.Н. Текстура поверхности и ее измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2021. — 234 с. — DOI 10.18720/SPBPU/2/si21-419

18. DSB Singlehead NG XM thin-cutting band saw. Wintersteiger AG. 2022. URL: https://www.wintersteiger.com/download/?file=11925 (дата обращения: 22.11.2025)
19. Očkaj M., Đurković I., Gorišek Z. Influence of band saw blade design parameters on cutting accuracy and surface roughness in wood processing. Wood Research. 2024;69(1):113-124. DOI: 10.37724/WC.2024.0009
20. Němec L.K., Tippner J., Horáček P. Experimental study on the effect of blade geometry on band saw cutting performance in beech wood. European Journal of Wood and Wood Products. 2021;79(5):1067-1077. DOI: 10.1007/s00107-021-01701-6
21. Donner C. Band Saw Blade. 2024. URL: https://www.bandsaege-tests.de/bandsaegeblaetter
22. Sandak A., Sandak J., Burger M. The role of tooth geometry in band saw blade stability and cutting accuracy during hardwood ripping. Materials. 2022;15(18):6421. DOI: 10.3390/ma15186421
23. Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л. Усталостная прочность ленточных пил // Известия вузов. Лесной журнал. – 2023. – № 4. – С. 136-145. – DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-136-145

Reference

1. Band Saw Blades Market: Expansion Fueled by Rising Demand in Metal Cutting, Wood Processing, and Construction Industries. Global Insight Services (GIS). 2025. URL: https://linkewire.com/2025/11/20/band-saw-blades-market/
2. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M. Minor cutting edge angles of sawing teeth: Effect on cutting forces in wood. Eur. J. Wood Wood Prod. 2022;80:1165-1173. DOI: 10.1007/s00107-022-01833-3
3. Orlowski K.A., Chuchala D., Przybylinski T., Legutko S. Recovering evaluation of narrow-kerf teeth of mini sash gang saws. Materials. 2021;14(23):7459. DOI: 10.3390/ma14237459
4. Analiz rynka lentochnykh pil v Rossii - 2025. Pokazateli i prognozy. [Analysis of the band saw blades market in Russia - 2025. Indicators and forecasts]. Moscow: TEBIZ; 2025. 129 p. (In Russ.). URL: https://tebiz.ru/mi/rynok-lentochnykh-pil-v-rossii
5. Melekhov V. I., Solov'ev I. I., Sazanova E. V., Ponomareva N. G. Povyshenie rabotosposobnosti lentochnykh pil lokal'nym teplofizicheskim vozdeystviem na polotno. [Improving the performance of band saw blades by local thermophysical impact on the blade]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2024;6(402):175-183. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-175-183
6. Orlowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Assessment of wear of the bandsaw teeth in industrial conditions. Acta Facultatis Xylologiae Zvolen. 2022;64(2):69-76. DOI: 10.17423/afx.2022.64.2.07
7. Repák R., Šušteršič M., Kavčič M. Impact of band saw blade thickness and width on cutting deviation in longitudinal sawing of oak wood. Drvna Industrija. 2023;74(3):257-266. DOI: 10.5552/drvind.2023.2245
8. Orlowski K.A., Chuchala D., Szczepanski M., Migda W., Wojnicz W. Lateral forces determine dimensional accuracy of the narrow-kerf sawing of wood. Sci. Rep. 2022;12:86. DOI: 10.1038/s41598-021-04129-3
9. Erchinger F., Rapp C., Schuler T. Geometric optimization of band saw blades for improved dimensional accuracy in furniture wood processing. Procedia CIRP. 2023;117:395-400. DOI: 10.1016/j.procir.2023.05.026
10. Scheidl J., Diebold J. Finite element modal analysis of moving bandsaw blades using incremental rod theory with consideration of the pre-stress distribution in the cross section. In: 95th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics: April 7th - 11th, 2025: Poznan (Poland): Book of Abstracts. 2025. p. 102
11. Dukić I., Merhar M., Jovanović J., Herceg D. Analysis of circular saw tooth marks profile on material machined surface after filtering with Fast Fourier Transform (FFT). Drvna Industrija. 2022;73(2):151-162. DOI: 10.5552/drvind.2022.0011
12. Meulenberg V., Ekevad M., Svensson M., Broman O. Minor cutting edge force contribution in wood band-sawing. J Wood Sci. 2022;68:18. DOI: 10.1186/s10086-022-02023-8

13. Orlowski K.A., Chuchala D., Stenka D., Przybylinski T. Capacity of Surface Production of Band Sawing in Manufacture of Oak Floor Upper Layers. BioResources. 2023;18(2):2789-2799. DOI: 10.15376/biores.18.2.2789-2799
14. Baranski A., Prządka M., Węgrzyn R. Geometrical and technological factors affecting band saw cutting accuracy in furniture manufacturing. Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry. 2021;63(4):256-265. DOI: 10.2478/ffp-2021-0022
15. Očkaj T., Đurković I., Glavas M. Effect of band saw blade geometrical parameters on kerf quality and cutting accuracy in wood machining. Drvna Industrija. 2023;74(2):145-154. DOI: 10.5552/drvind.2023.2208
16. Klement P., Hlávková J., Bajzáth T. Influence of tooth geometry and blade width on the stability and accuracy of band sawing in hardwood. Wood Research. 2022;67(3):387-398. DOI: 10.37724/SR.2022.0029
17. Tabenkin A. N. Tekstura poverkhnosti i ee izmerenie. Sherokhovatost', volnistost', profil', topografiya. [Surface texture and its measurement. Roughness, waviness, profile, topography]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta; 2021. 234 p. (In Russ.). DOI: 10.18720/SPBPU/2/si21-419
18. DSB Singlehead NG XM thin-cutting band saw. Wintersteiger AG. 2022. URL: https://www.wintersteiger.com/download/?file=11925 (дата обращения: 22.11.2025)
19. Očkaj M., Đurković I., Gorišek Z. Influence of band saw blade design parameters on cutting accuracy and surface roughness in wood processing. Wood Research. 2024;69(1):113-124. DOI: 10.37724/WC.2024.0009
20. Němec L.K., Tippner J., Horáček P. Experimental study on the effect of blade geometry on band saw cutting performance in beech wood. European Journal of Wood and Wood Products. 2021;79(5):1067-1077. DOI: 10.1007/s00107-021-01701-6
21. Donner C. Band Saw Blade. 2024. URL: https://www.bandsaege-tests.de/bandsaegeblaetter
22. Sandak A., Sandak J., Burger M. The role of tooth geometry in band saw blade stability and cutting accuracy during hardwood ripping. Materials. 2022;15(18):6421. DOI: 10.3390/ma15186421
23. Prokof'ev G. F., Kovalenko O. L. Ustalostnaya prochnost' lentochnykh pil. [Fatigue strength of band saw blades]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2023;4:136-145. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-136-145

Сведения об авторах

Стародубов Александр Сергеевич – преподаватель кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0009-0007-9735-7696, e-mail: alexoldoak@mail.ru.

✉ *Платонов Алексей Дмитриевич* – доктор техн. наук, заведующий кафедрой древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-6287, e-mail: aleksey66@yandex.ru.

Брындина Лариса Васильевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-2345-6789, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Information about the authors

Aleksandr S. Starodubov – Lecturer, Department of Mechanical Wood Technology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0009-0007-9735-7696, e-mail: alexoldoak@mail.ru.

✉ *Aleksey D. Platonov* – Dr. Sci. (Engineering), Head of the Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-6287, e-mail: aleksey66@yandex.ru

Larisa V. Bryndina – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-2345-6789, e-mail: bryndinv@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/25
УДК 630* УДК 674.81:621.879.3:629.3.023.4

Моделирование влияния буксования движителей на устойчивость лесных машин при маневрировании на слабонесущих склонах

Владимир Я. Шапиро[1], shapiro54vlad@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-6344-1239
Игорь В. Григорьев[2], silver73@inbox.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-5574-1725
Ярослав А. Рыжов[3], ✉ irosmagelav@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0000-8336-1124
Евгений А. Тихонов[4], tihonov@petrsu.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-2136-3268
Павел Н. Перфильев[5], savadf0706@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-3041-7512
Сергей В. Египко[6], egipko_s@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8356-7026

[1] *ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация*
[2] *ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д 3, Якутск, 677007, Российская Федерация*
[3] *ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация*
[4] *ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33, 185035, Российская Федерация*
[5] *ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д 17, Архангельск, 063002, Российская Федерация*
[6] *Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, д. 111, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация*

Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизировать деградацию слабонесущих лесных почв при возрастающих нагрузках от современной колесной техники, особенно в условиях сложного рельефа и переувлажнения. Цель исследования -комплексное изучение взаимодействия колесных лесных машин с влажными слабонесущими почвогрунтами на склонах с учетом критического фактора – буксования движителей. Для ее достижения разработана математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между буксованием, образованием колеи и угловыми отклонениями машины. В результате проведенного моделирования установлено, что даже при низком уровне буксования (δ=0,02) предел прочности грунта на сдвиг снижается катастрофически – с 18,54 кПа до 7,49 кПа, что составляет падение на 60%. При увеличении влажности грунта до предела текучести (W=41%) его прочность дополнительно уменьшается на 50%. Определено, что комбинированное воздействие буксования и переувлажнения приводит к снижению сопротивления сдвигу до критических значений в 3–3,5 кПа. В этих условиях внешнее давление на грунт не должно превышать 10–15 кПа. Расчеты показали, что допустимый угол маневрирования на крутых склонах (>20°) при сильном буксовании не должен превышать 10–15°, а на пологих склонах с минимальным буксованием может достигать 20–25°. Полученные результаты доказывают, что буксование является определяющим фактором деградации слабонесущих грунтов и должно быть ключевым параметром при планировании лесозаготовительных операций для минимизации экологического ущерба.

Ключевые слова: *колесные лесные машины, трелевочные системы, почвогрунт, буксование, лесные машины*

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, https://rscf.ru/project/23-16-00092/.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Моделирование влияния буксования движителей на устойчивость лесных машин при маневрировании на слабонесущих склонах/ В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, Я.А. Рыжов, Е.А. Тихонов, П.Н. Перфильев, С.В. Египко // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 421-436. – *Библиогр.: с. 432-435 (25 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/25.

Поступила 14.04.2025. ***Пересмотрена*** 10.10. 2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Modeling of the effect of sliding propellers on the stability of forest vehicles when maneuvering on low-bearing slopes

Vladimir Ya. Shapiro [1], shapiro54vlad@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-6344-1239
Igor V. Grigorev [2], silver73@inbox.ru, https://orcid.org/ 0000-0002-5574-1725
Yaroslav A. Ryzhov [3], ✉ irosmagelav@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0000-8336-1124
Evgeny A. Tikhonov [4], tihonov@petrsu.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-2136-3268
Pavel N. Perfiliev [5], savadf0706@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-3041-7512
Sergey V. Egypko [6], egipko_s@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-8356-7026

[1] *St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Institutsky Lane, 5, 194021, Russian Federation*

[2] *Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, 677007, Russian Federation*

[3] *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Timiryazev str., 8, 394087, Russian Federation*

[4] *Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185035, Russian Federation*

[5] *Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation*

[6] *Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov is a branch of the Don State Agrarian University, 111 Pushkinskaya str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation*

The relevance of the study is due to the need to minimize the degradation of low-bearing forest soils under increasing loads from modern wheeled vehicles, especially in conditions of difficult terrain and waterlogging. The purpose of the study is a comprehensive study of the interaction of wheeled forest vehicles with wet, low-bearing soils on slopes, taking into account the critical factor of engine stalling. To achieve this, a mathematical model has been developed that establishes the relationship between skidding, track formation and angular deviations of the machine. As a result of the simulation, it was found that even at a low level of slipping ($\delta = 0.02$), the shear strength of the soil decreases catastrophically – from 18.54 kPa to 7.49 kPa, which is a drop of 60%. With an increase in soil moisture to

the yield point (W = 41%), its strength additionally decreases by 50%. It is determined that the combined effect of slipping and waterlogging leads to a decrease in shear resistance to critical values of 3-3.5 kPa. Under these conditions, the external pressure on the ground should not exceed 10-15 kPa. Calculations have shown that the permissible maneuvering angle on steep slopes (> 20 °) with heavy skidding should not exceed 10-15 °, and on gentle slopes with minimal skidding can reach 20-25 °. The results obtained prove that skidding is a determining factor in the degradation of low-bearing soils and should be a key parameter in planning logging operations to minimize environmental damage.

Keywords: *wheeled forestry machines, skidding systems, soil ground, skidding*

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, https://rscf.ru/project/23-16-00092 /.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school «Innovative developments in the field of logging industry and forestry».

Conflict of interest: wheeled forestry machines, skidding systems, soil foundation, skidding.

For citation: Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Ryzhov Ya.A., Tikhonov E.A., Perfiliev P.N., Egypko S.V. Modeling of the effect of sliding propellers on the stability of forest vehicles when maneuvering on low-bearing slopes. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 421-436 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/25.

Received 14.04.2025. ***Revised*** 10.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025

Введение

Современные лесозаготовительные процессы характеризуются высокой степенью механизации, что обеспечивает экономическую эффективность операций, но одновременно создает серьезные вызовы для устойчивости лесных экосистем. В данном контексте особую актуальность приобретает комплексное изучение воздействия лесозаготовительной техники на почвенный покров, особенно в сложных топографических и почвенных условиях.

Переходя к анализу непосредственных последствий механического воздействия, следует отметить, что многочисленные исследования демонстрируют значительное уплотнение почвы под воздействием колесной лесной техники. В этом отношении Petrosyan et al. (2022) [22] разработали математические модели, устанавливающие корреляцию между глубиной колеи и параметрами машины (масса, размеры колес, давление в шинах) при различных значениях несущей способности почвы. Полученные зависимости позволяют определять допустимые нагрузки на почвенный покров для минимального экологического ущерба.

Развивая этот подход, Riggert et al. (2018) [21] разработали комплексную схему оценки деградации почв, вызванной лесозаготовительной техникой, выделив четыре ключевых процесса деформации: упругую деформацию, пластическую деформацию, разрушение несущей способности и гомогенизацию структуры почвы.

Эмпирические исследования подтверждают теоретические выкладки. Так, Baek et al. (2022) [2] продемонстрировали, что после проходов харвестера уплотнение почвы увеличилось на 17% на глубине 0-10 см и на 27% на глубине 10-20 см. В трассах форвардера уплотнение было еще более значительным - 30% и 20% на соответствующих глубинах. Аналогичные результаты получили Presecan et al. (2024) [19], подтвердившие значительное увеличение сопротивления пенетрации почвы после 15 проходов техники для трелевки.

Следующим важным аспектом воздействия является образование колеи. Startsev

et al. (2022) [5] установили, что после трех проходов техники средняя глубина колеи составляет 11 ± 3 см, тогда как после десяти проходов она может достигать 66 см со средним значением 27 ± 4 см. Erktan, A et al. (2023) [6] подтвердили, что сухая объемная плотность почвы увеличивается с глубиной колеи, достигая максимальных значений в середине полосы движения.

Рассматривая гидрологические аспекты, следует отметить, что исследования показывают значительное ухудшение характеристик почв на трелевочных волоках. Насыщенная гидравлическая проводимость была наименьшей в самых глубоких колеях, что также касалось пористости почвы, в первую очередь из-за уменьшения количества крупных пор.

Анализируя факторы воздействия, необходимо прежде всего рассмотреть влияние типа и веса техники. Сравнительные исследования демонстрируют значительные различия в воздействии различных типов техники. **Presecan et al. (2024)** [18] установили, что трелевка лошадьми оказывает наименьшее воздействие на сопротивление пенетрации почвы, в то время как трелевка тракторами приводит к более значительным изменениям.

Дальнейшее развитие этот подход получил в работе Шапиро и др. (2025) [25], где было установлено, что машины с конфигурацией 4×4 и 6×6 вызывают уплотнение почвы на 23-50% уже после первых четырех проходов. При этом наименьшее повреждение лесных почв (21-31%) отмечается при движении скидеров в груженом и порожнем состоянии.

Количество проходов техники является критическим фактором, определяющим степень нарушения почвы. **Muhdi et al. (2022)** [16] продемонстрировали, что плотность почвы увеличивается с ростом интенсивности трелевки: после 5, 10 и 15 проходов экскаватора. **Startsev et al. (2022) [**5] подтвердили, что количество проходов-нарушителей является решающим фактором в изменениях почвы.

Важным параметром, определяющим степень воздействия, является влажность почвы во время операций. Germer et al. (2025) [7] установили, что механическая подготовка участка (MSP), проводимая в сухой период, дает лучшие результаты для роста корней по сравнению с MSP, выполненной в влажный период. Это связано с тем, что влажные почвы более склонны к пластической деформации и имеют меньшую несущую способность.

Завершая рассмотрение факторов воздействия, следует отметить влияние типа почвы. **Riggert et al. (2018)** [21] разработали схему оценки, различающую внутренние параметры почвы (миграция глины, матричный потенциал) и внешние параметры (нагрузка на колесо, площадь контакта). Исследования показывают, что глинистые почвы более склонны к уплотнению, чем песчаные.

В контексте прогнозирования воздействия особый интерес представляют топографические индексы. Ученые исследуют методы прогнозирования проходимости почвы с использованием картографических индексов, таких как глубина до воды (DTW) и топографический индекс влажности (TWI). Однако мета-анализ **Latterini et al. (2024)** [12] показал, что индекс DTW в его текущей форме не является полностью надежным предсказателем участков почвы, чувствительных к нарушениям, вызванным техникой.

Математическое моделирование представляет перспективное направление в оценке воздействия. Разработана аналитическая модель для анализа несущей способности зимних лесных дорог, которая сокращает количество необходимых расчетов и улучшает прогнозы грузоподъемности. Karnaukhov et al. (2023) [9] представили методологию расчета оптимальных параметров гусеничного лесного погрузчика.

Переходя к стратегиям минимизации воздействия, следует прежде всего рассмотреть оптимизацию конструкции техники. **Подрубалов и Мекедов (2023) [23]** предложили методы улучшения ключевых показателей колесных тракторов на склонах: блокировку дифференциала, понижение центра тяжести, использование шин с высокими проушинами, дополнительных стальных колес и расширителей.

Особого внимания заслуживает исследование **Makunina et al. (2023) [14],** доказавшее эффективность трехосной компоновки скидеров. Установлено, что такое решение позволяет снизить удельное давление на грунт до 74,7 кПа против 102,8 кПа у двухосных аналогов, что существенно улучшает проходимость и уменьшает перегрузку задней оси в условиях ограниченной несущей

В контексте системного подхода к минимизации экологического воздействия представляет интерес комплексный анализ **Labelle et al. (2021) [11],** выделивший три ключевых направления оптимизации:

- модификации машин (использование шин с высоким профилем и снижение давления в шинах)
- применение дополнительных средств защиты (щебеночные маты из остатков заготовки)
- совершенствование операционного планирования (внедрение карт проходимости с актуальными метеоданными)

Рассматривая вопросы энергоэффективности, следует отметить исследование **Prinz et al. (2023) [20],** установившее прямую зависимость расхода топлива форвардеров от количества проходов по одному участку. Примечательно, что грузоподъемность машины не оказывает статистически значимого влияния на расход топлива, что смещает акцент на оптимизацию маршрутов движения.

Перспективным направлением развития лесной техники является внедрение гибридных силовых установок. **Šušnjar et al. (2023) [15]** на основе экспериментальных данных продемонстрировали потенциальную эффективность гибридных скидеров, способных значительно снизить расход топлива и выбросы загрязняющих веществ.

Среди альтернативных технологий **Mahura et al. (2023)** [13] подтвердили эффективность устройства «ходячие сани» для трелевки в сложных условиях болотистых местностей, которое сочетает преимущества скользящих и колесных движителей. **Nunes et al. (2023)** [18] исследовали потенциал тяги животных как альтернативного метода восстановления остаточной древесной биомассы.

Лесоводственные методы также вносят значительный вклад в минимизацию воздействия. **Karami et al. (2022)** [8] исследовали среднесрочные эффекты двух методов лесоводства - метода однократного выбора и метода группового выбора - на характеристики почвы, показав, что метод однократного выбора вызывает меньшие нарушения. **Nieminen et al. (2023)** [17] изучили влияние непрерывного земледелия и одновозрастного лесоводства на нагрузку азотом и фосфором из лесных водосборных районов.

Завершая анализ воздействия, необходимо рассмотреть вопросы восстановления нарушенных почв. Исследования показывают, что процесс восстановления почв после механических воздействий требует значительного времени. **Karami et al. (2022) [8]** установили, что для восстановления почвы до условий до рубки требуется не менее 3 лет. **Startsev et al. (2022)** [5] отметили, что отрастание основных видов деревьев в первый год после рубки чрезвычайно неравномерно, а в зонах с сильным нарушением не наблюдается отрастания.

Проведенный анализ демонстрирует значительный прогресс в понимании воздействия лесозаготовительной техники на почвенные экосистемы и разработке стратегий его минимизации. Однако, несмотря на разнообразие рассмотренных подходов и методов, тема особенностей маневрирования колесных лесных машин и трелевочных систем на склонах слабонесущих почвогрунтов с учетом эффекта буксования остается недостаточно изученной и требует продолжения исследований.

Актуальность данной проблематики обусловлена необходимостью обеспечения устойчивого лесопользования в условиях сложного рельефа и ограниченной несущей способности грунтов. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке комплексных моделей, учитывающих взаимовлияние конструктивных параметров

техники, почвенно-грунтовых условий и топографических особенностей территории, включая динамические аспекты взаимодействия движителей с грунтом при маневрировании на склонах.

Цель исследования - комплексное изучение взаимодействия колесных лесных машин с влажными слабонесущими почвогрунтами на склонах с учетом критического фактора – буксования движителей. Исследование направлено на разработку математических моделей и практических рекомендаций для минимизации деградации почв и обеспечения работоспособности трелевочных волоков в сложных условиях.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач использовался комплекс методов математического моделирования и численного анализа. Основой исследования послужили разработанные авторами математические модели, описывающие взаимодействие лесных машин с почвогрунтами на склонах с учетом эффекта буксования.

Основой исследования послужила математическая модель, описывающая образование колеи и угловые отклонения при маневрировании:

$$h_k = a\left[\frac{p}{2\tau}(1-\gamma)(1+sin2\theta)\right]^{1/n}, \quad (1а)$$

откуда

$$\theta = 0{,}5\ arcsin\left[2\tau\frac{(h_k/a)^n}{p(1-\gamma)} - 1\right]. \quad (1б)$$

где:

- h_k - глубина колеи, м
- a - радиус контактной площадки, м
- p - вертикальное внешнее давление на почвогрунт, кПа
- τ - предел прочности на сдвиг, кПа
- γ - коэффициент бокового давления
- θ - угол отклонения трактора от заданного направления движения, рад
- n - коэффициент затухания волны напряжений сжатия

Уравнение угла маневрирования:

$\theta = 0{,}5\ arcsin\left[2\tau\frac{(h_k/a)^n}{p(1-\gamma)} - 1\right]$.

Параметры модели

Исходные данные и параметры исследования

Геометрические параметры:

- Вес лесной машины: Q = 8 т
- Длина опорной поверхности: L = 0,42 м
- Ширина опорной поверхности: B = 0,73 м
- Площадь контакта: S = 0,3066 м²
- Радиус контактной площадки: a = 0,19-0,23 м (в зависимости от влажности)

Параметры почвогрунта:

Исследовались два состояния влажности суглинка:

Состояние 1 (W = 32%, W/W_т = 0,78):

Сцепление: C = 10,9 кПа

Угол внутреннего трения: φ = 17,5°

Модуль общей деформации: E = 700 кПа

Коэффициент Пуассона: ν = 0,32

Состояние 2 (W = 41%, W/W_т = 1,00):

Сцепление: C = 6,5 кПа

Угол внутреннего трения: φ = 13,3°

Модуль общей деформации: E = 400 кПа

Коэффициент Пуассона: ν = 0,41

Диапазоны варьируемых параметров:

Угол наклона склона: α = 0-30°

Коэффициент буксования: δ = 0,02-0,32

Допустимая глубина колеи: h_д = 0,2-0,3 м

Коэффициент деформации шины: η = 0,93

Коэффициент трения: K_тр = 0,4-0,6

Методика расчета

Расчеты проводились с использованием разработанного математического аппарата с последовательным определением:

1. Параметров прочности грунта для различных состояний влажности.
2. Критических давлений и сил сцепления при различных уровнях буксования.
3. Допустимых углов маневрирования с учетом ограничений по глубине колеи.
4. Анализ совместного влияния угла наклона склона и коэффициента буксования.

Все расчеты выполнялись с контролем выполнения условий прочности и сцепления, что обеспечивало физическую достоверность полученных результатов.

Результаты исследований

В результате проведенного математического моделирования и численного анализа получены количественные оценки влияния ключевых факторов на процесс взаимодействия лесных машин с почвогрунтами при маневрировании на склонах. Исследование позволило установить функциональные зависимости между параметрами почвогрунта, характеристиками лесных машин и условиями их эксплуатации, что обеспечивает научную основу для оптимизации технологических процессов лесозаготовок в сложных геотехнических условиях.

Проведена оценка диапазона изменения допустимого угла маневрирования θд в зависимости от параметра Кτ = τ/p при фиксированном значении допустимой глубины колеи hд = a = 0,2 м и коэффициенте Пуассона ν = 0,35, характерном для слабонесущих влажных почвогрунтов (рисунок 1).

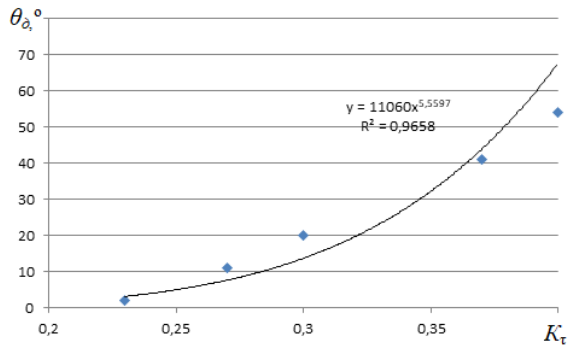


Рисунок 1. Зависимость предельного угла маневрирования от отношения предела прочности почвогрунта на сдвиг к величине вертикального давления

Figure 1. Dependence of the maximum maneuvering angle on the ratio of the shear strength of the soil to the vertical pressure

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Установлено, что зависимость θд(Кτ) имеет параболический характер. Увеличение параметра Кτ, соответствующее росту прочности почвогрунта или снижению внешнего давления, позволяет существенно расширить диапазон допустимого маневрирования транспортного средства.

Механизм разрушения почвогрунта

Для условий работы на влажных почвогрунтах при ν = 0,35 коэффициент бокового распора составляет γ = 0,55. Согласно моделям разрушения грунтов с внутренним трением [17-19], тангенциальные напряжения растяжения σθ = γσh достигают 55% от вертикальных сжимающих напряжений σh = p/(h/a)^n.

Критерием разрушения принято условие, при котором максимальное напряжение сдвига σ = 0,5(σh - σθ) превышает предел прочности почвогрунта на сдвиг τ. Глубина h, удовлетворяющая данному условию, принимается в качестве расчетной глубины колеи hк.

Коэффициент затухания напряжений при взаимодействии плоского отпечатка колеса с поверхностью склона составляет n = 0,725. Соответственно, показатель степени в уравнении роста глубины колеи равен 1/n = 1,4. Данное значение отличается от коэффициента, равного 2, используемого в классических моделях образования колеи [22-26].

Указанное расхождение обусловлено учетом внутреннего трения массива почвогрунта и особенностей взаимодействия плоского участка фронта сжатия краевой зоны. Реализуемый механизм характеризуется менее интенсивным затуханием напряжений сжатия при погружении штампа, что приводит к увеличению зоны разрушения, глубины колеи hк и расширению диапазона угла маневрирования θ.

Диапазон изменения угла θд составляет от 0 до 68°, при этом зависимость от параметра Кτ имеет степенной характер с показателем степени более 5.

Для обеспечения работоспособности трелевочного волока при глубине колеи не более hд = 0,2 м допустимый угол маневрирования ограничен величиной 20°. При этом давление p на почвогрунт не должно превышать трехкратного значения предела прочности на сдвиг τ.

Для влажных почвогрунтов (супеси, суглинки) со средними значениями τ = 12-15 кПа допустимый диапазон внешнего давления составляет р = 36-45 кПа. Снижение давления на 30-35% до 27-30 кПа (увеличение Кτ с 0,3 до 0,37) позволяет расширить диапазон маневрирования в 2 раза - с 20° до 40° при сохранении ограничения по глубине колеи.

Исследования [3,10] демонстрируют зависимость параметров прочности от влажности почвогрунта W и его положения на поверхности склона. Наиболее значительное снижение прочностных характеристик наблюдается при превышении влажностью 75% от предела текучести Wт.

В таблице 1 представлены показатели физико-механических свойств суглинка при Wт = 41% для двух состояний влажности.

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств влажного почвогрунта

Table 1

Indicators of physical and mechanical properties of wet soil

W, %	$W/W_т$	Состояние почвогрунта	C, кПа	φ, °	E, кПа	ν
32	0,78	влажный	10,9	17,5	700	0,32
41	1,00	переувлажненный	6,5	13,3	400	0,41

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 2

Расчетные величины параметров давлений и пределов прочности почвогрунта на сдвиг

Table 2

Calculated values of pressure parameters and shear strength limits of the soil

W, %	$P_б$, кПа	$K_б$	Δp, кПа	τ, кПа	$\Delta\tau$, кПа	$\tau_б$, кПа
32	24,15	1,02	0,37	18,54	11,05	7,49
41	15,24	1,61	9,28	12,42	8,77	3,65

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Показатели предельного угла маневрирования при буксовании

Table 3

Indicators of the maximum maneuvering angle during skidding*

W, %	a, м	hk, м	hд, м	θд, ° (δ=0,02)	θд, ° (δ=0,12)	θд, ° (δ=0,22)	θд, ° (δ=0,32)
32	0,19	0,16	0,20	17	15	13	11
41	0,23	0,24	0,30	22	19	17	15

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Способность почвогрунта сопротивляться сдвиговым нагрузкам при буксовании описывается зависимостью:

$$\tau(\mathrm{x}) = \tau_{max}\, e^{-\mu x} = (C + \mathrm{p}tg\varphi)e^{-\mu x}, \quad (3)$$

где

μ = δ/η; δ - коэффициент буксования;

η - коэффициент деформации шины.

Интегральная сила сцепления определяется выражением:

$$F_c = \mathrm{B}\int_0^L \tau(\mathrm{x})\,\mathrm{dx}. \quad (4)$$

Локальная величина силы сцепления в некоторой срединной точке $\bar{x}$ интервала [0, L]:

$$F_c(\bar{x}) = BL \cdot \tau(\bar{x}). \quad (5)$$

Усредненное значение силы сцепления:

$$F_c = S(C + p tg\varphi)e^{-\mu L/2}. \quad (6)$$

Условие обеспечения эффективного сцепления:

$$F_c \geq F_{c\delta} = Q(К_{тр} \cdot \cos\alpha + \sin\alpha) = pS(К_{тр} \cdot \cos\alpha + \sin\alpha), \quad (7)$$

где $К_{тр}$ – коэффициент трения шины о почвогрунт.

Критическое давление, при котором происходит потеря тягово-сцепных свойств:

$$p_б = \frac{Ce^{-\mu L/2}}{(К_{тр}\cos\alpha + \sin\alpha) - tg\varphi \cdot e^{-\mu L/2}}. \quad (8)$$

На рисунке 2 представлены зависимости критерия Кб = р/рб от коэффициента буксования δ для двух состояний влажности.

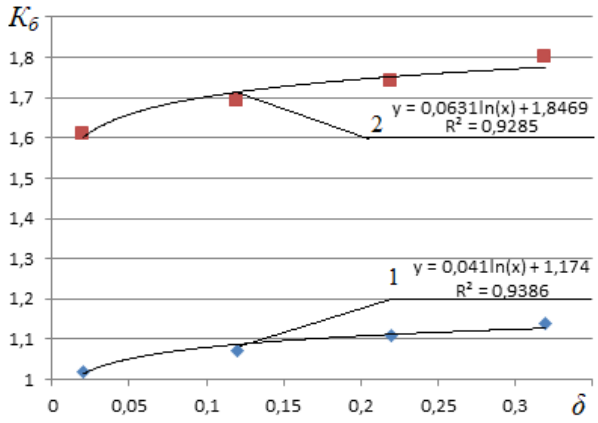


Рисунок 2. Влияние коэффициента буксования на критерий снижения тягово-сцепных свойств движителя:
1 - *W*=32%; 2 - *W*=41%

Figure 2. The effect of the slip coefficient on the criterion for reducing the traction properties of the propulsor
1 - *W*=32%; 2 - *W*=41%

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Полученные зависимости Кб(δ) имеют асимптотический характер, что свидетельствует о наибольшей эффективности буксования на начальных стадиях процесса. Классификация уровня буксования: низкое (δ = 0,02), среднее (δ = 0,12), сильное (δ = 0,22) и очень сильное (δ = 0,32).

При переходе влажности от 0,75Wт до Wт превышение внешнего давления р над допустимым уровнем рб увеличивается на 55-60%.

В таблице 2 представлены расчетные параметры для условий буксования при δ = 0,02.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном снижении тягово-сцепных свойств при работе на крутых склонах со слабонесущими переувлажненными почвогрунтами, когда даже внешнее давление р = 20-30 кПа приводит к потере сцепления с поверхностью движения.

Обсуждение

Проведенный анализ данных таблицы 2 демонстрирует существенное влияние буксования на прочностные характеристики почвогрунта. Установлено, что буксование лесной машины на крутом склоне, сложенном влажными почвогрунтами, приводит к снижению предела прочности на сдвиг с τ = 18,54 кПа до τб = 7,49 кПа, что соответствует уменьшению на Δτ = 11,05 кПа или 60%.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном снижении тягово-сцепных свойств движителя уже на начальной стадии буксования. Сравнительный анализ показывает, что при увеличении влажности с W = 32% до W = 41% величина τ снижается на 50% (с 18,54 до 12,42 кПа), тогда как при учете эффекта буксования наблюдается двукратное снижение τб.

Согласно данным работы [20], при работе на оттаивающих почвогрунтах, склонных к солифлюкции, наблюдается пятикратное снижение параметров прочности: сцепления до 4,1 кПа и угла внутреннего трения до φ = 4,25°. При внешнем давлении р ≈ 30 кПа это обусловливает снижение τ до 6-7 кПа даже при отсутствии буксования.

Расчеты показывают, что комбинированное воздействие эффектов буксования и солифлюкции на многолетнемерзлых почвогрунтах приводит к дополнительному двукратному снижению

сопротивления сдвиговым нагрузкам до 3-3,5 кПа. Данное обстоятельство требует ограничения нагрузок на поверхность склона величиной 10 кПа и широкого применения лебедочных систем для перемещения груженых лесных машин.

На рисунке 3 представлена зависимость предела прочности почвогрунта на сдвиг от коэффициента буксования при W = 32% без учета эффекта солифлюкции.

Анализ рисунка 3а показывает, что влияние буксования на снижение τ проявляется немедленно на начальной стадии процесса, приводя к многократному снижению τ до уровней τб ≈ 7,5 кПа. При дальнейшем увеличении буксования от среднего (δ = 0,12) до сильного и очень сильного (δ = 0,32) наблюдается дополнительное снижение τб по линейному закону (рисунок 3б).

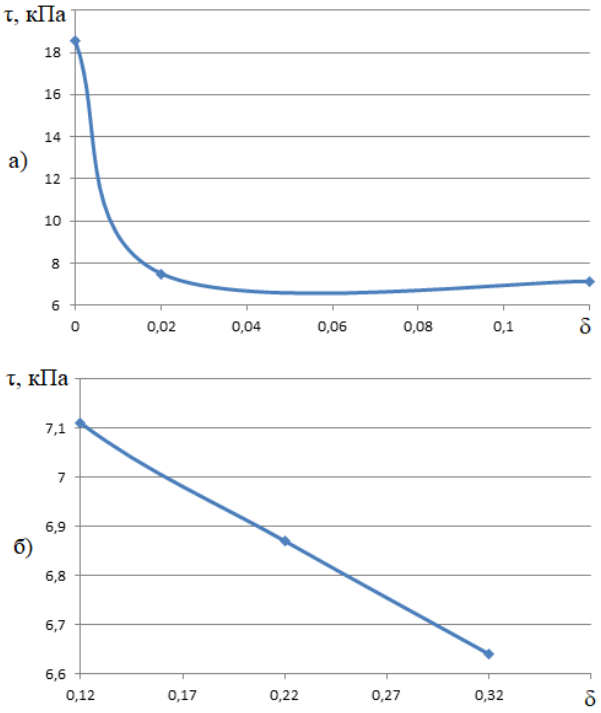


Рисунок 3. Зависимость предела почвогрунта прочности на сдвиг при уровне буксования:
а) низком и среднем; б) сильном и очень сильном
Figure 3. Dependence of the soil shear strength limit at the level of slipping:
a) low and medium; b) strong and very strong
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Сводный анализ результатов

Полученные значения τб = 6,7-7,5 кПа приблизительно в три раза меньше исходной величины вертикального давления p = 24,52 кПа, что согласуется с выводами, полученными при анализе данных рисунка 1, о существовании верхних ограничений внешнего давления при работе на крутых склонах с влажными слабонесущими почвогрунтами.

Сравнительный анализ с данными таблицы 2 позволяет утверждать, что фактор буксования на начальной стадии является значимым при оценке тягово-сцепных свойств движителя в процессе маневрирования. Необходимо учитывать границы допустимых отклонений от заданной траектории движения для обеспечения проектной работоспособности трассы [24,25].

В таблице 3 представлены расчетные значения θд при различных коэффициентах буксования для лесной машины весом Q = 8 т.

Радиус контактной площадки a и глубина колеи hk определены в соответствии с математическими моделями [17-20] и методическими рекомендациями [21]. При изменении параметра Q величина a изменяется пропорционально $\sqrt[3]{Q}$.

Для переходного состояния влажности почвогрунта (W>0,75Wт) в качестве прогнозного значения принята глубина hд = 0,2 м. При достижении влажностью предела текучести (W ≈ Wт) расчетная глубина колеи hk превышает 0,2 м и достигает 0,3 м и более, поэтому для данных условий принято hд = 0,3 м.

На рисунке 4 представлено относительное снижение Δθ от δ для двух состояний влажности почвогрунта.

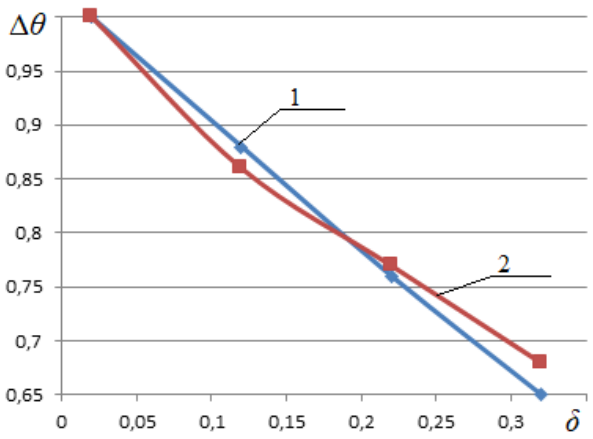


Рисунок 4. Влияние буксования на относительные изменения допустимого угла маневрирования лесной машины на склоне:
1 - *W*=32%; 2 - *W*=41%

Figure 4. The effect of skidding on relative changes in the permissible maneuvering angle of a forest vehicle on a slope:
1 - *W*=32%; 2 - *W*=41%

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

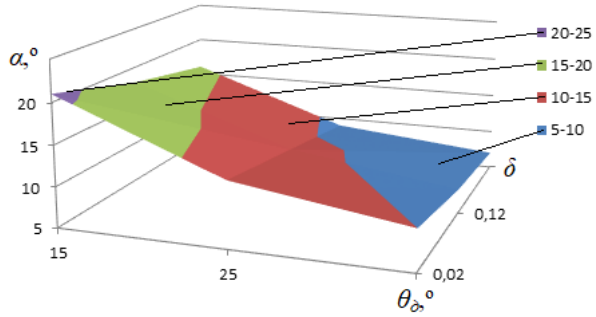


Рисунок 5. Совместное влияние угла наклона склона и уровня буксования на допустимый угол маневрирования лесной машины при *W*=32%

Figure 5. The combined effect of the slope angle and the level of skidding on the permissible maneuvering angle of a forest vehicle at W=32%

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Несмотря на различия абсолютных значений θд, относительные изменения допустимого угла маневрирования Δθ в процессе буксования демонстрируют незначительную зависимость от влажности - графики функций θд(δ) практически совпадают.

На рисунке 5 представлено совместное влияние угла наклона склона α и коэффициента буксования δ на угловой параметр θд при W = 32%.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости ограничения маневрирования на очень крутых склонах (α >30°) величиной θд = 5-10° при любом уровне буксования, что предполагает преимущественно прямолинейное движение для обеспечения заданной глубины колеи hд = 0,2 м.

На крутых склонах (α>20°) допустимый диапазон маневрирования увеличивается до 10-15°, а на покатых склонах - до 15-20°. На пологих и покатых склонах при α ≤ 15° и низком уровне буксования допускается маневрирование с углами 20-25°.

Анализ уравнения (1б) показывает эквивалентность влияния вертикального давления p и предела прочности на сдвиг τ на угол θ через параметр Kτ = τ/p. Увеличение веса лесной машины Q и, соответственно, давления p эквивалентно снижению величины τ в процессе буксования.

Следует особо отметить, что при снижении сопротивления почвогрунта сдвиговым разрушениям до уровня 3,5-5 кПа нагрузка на пятно контакта с движителем не должна превышать 10-15 кПа.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование позволило установить количественные зависимости и разработать практические рекомендации по оптимизации маневрирования лесных машин на слабонесущих почвогрунтах склонов с учетом эффекта буксования:

1. Установлено, что даже начальная стадия буксования (δ = 0,02) приводит к снижению предела прочности почвогрунта на сдвиг на 60% - с 18,54 кПа до 7,49 кПа. При увеличении влажности до предела текучести (W = 41%) наблюдается дополнительное снижение прочности на 50%.
2. Определено, что при работе на переувлажненных почвогрунтах внешнее давление не должно превышать 10-15 кПа,

а совместное проявление эффектов буксования и солифлюкции снижает сопротивление сдвиговым нагрузкам до 3-3,5 кПа.

3. Разработана классификация допустимых углов маневрирования в зависимости от крутизны склона и уровня буксования:
   - На очень крутых склонах ($\alpha > 30°$): $\theta_д = 5\text{-}10°$
   - На крутых склонах ($\alpha > 20°$): $\theta_д = 10\text{-}15°$
   - На покатых склонах: $\theta_д = 15\text{-}20°$
   - На пологих склонах ($\alpha \leq 15°$): $\theta_д = 20\text{-}25°$
4. Полученные результаты позволяют научно обосновать ограничения при разработке технологических карт лесосечных работ и выбрать оптимальные траектории движения лесных машин в сложных геотехнических условиях.

Однако, несмотря на разнообразие рассмотренных подходов и полученных результатов, тема особенностей маневрирования колесных лесных машин и трелевочных систем на склонах слабонесущих почвогрунтов с учетом эффекта буксования остается актуальной и требует продолжения исследований, особенно в области разработки адаптивных систем управления и оптимизации конструктивных параметров движителей для работы в сложных геотехнических условиях.

Список литературы

1. Abelev A., Merrick T., Liang R., Vermillion M., Li R.-R., Buma W., and Swanson C.: Torque-Weighted Index Soil Strength Test (TWISST) for vegetated terrain, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-8418, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8418, 2023.
2. Baek K., Lee E., Choi H., Cho M., Choi Y., & Han S. Impact on Soil Physical Properties Related to a High Mechanization Level in the Row Thinning of a Korean Pine Stand. Land. 2022; 11 (3): 329. – DOI: https://doi.org/10.3390/land11030329.
3. Bragar E., Pronozin Y., Zhussupbekov A., Gerber A., Sarsembayeva A., Muzdybayeva T., & Sarabekova U. Z. Evaluation of the Strength Characteristics of Silty-Clayey Soils during Freezing-Thawing Cycles. Applied Sciences. 2022; 12 (2): 802. – DOI: https://doi.org/10.3390/app12020802.
4. Catherine Collet, Chloé Agro, Emila Akroume et al. Mechanical site preparation impacts on soil structural quality in a forest plantation depend on soil moisture and excavator size, 19 June 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4480823/v1].
5. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M. et al. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). Eurasian Soil Sc. 2022; 55: 1633–1646. – DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229322110023.
6. Erktan A., Or D., & Scheu S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. Soil Biology and Biochemistry. 2020; 148: 107876. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876.
7. Germer K., Shafiullah A. Z., Peters A., Kraft M., Weise M., Rolfes L., & Lorenz M. Field traffic loads on a silty farm site cause shifting and narrowing of soil pore size distribution. Soil and Tillage Research. 2025; 248: 106425. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106425.
8. Karami S., Latterini F., Jourgholami M. et al. The medium-term effects of forest operations on a mixed broadleaf forest: Changes in soil properties and loss of nutrients. Land Degradation & Development. 2023; 34 (10): 2961–2974. – DOI: 10.1002/ldr.4660.
9. Karnaukhov I., Babin V., Ivanov A., Romanenko M., Serebrennikov Y. Optimization of hydraulic drive parameters of caterpillar forest loader. E3S Web of Conferences. 2024; 525: 06013. – DOI: 10.1051/e3sconf/202452506013.
10. Katarov V., Syunev V., & Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation. Forests. 2022; 13 (10): 1538. – DOI: https://doi.org/10.3390/f13101538.
11. Labelle E. R., Borchert H., Aurenhammer P. K., Breinig L., & Spinelli R. Effect of season and machine type on performance of semi- and fully-mechanized harvesting systems in beech-dominated stands. Croatian Journal of Forest Engineering. 2024; 45 (2): 237–252. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.2281.

12. Latterini F., Venanzi R., Papa I., Đuka A., & Picchio R. A meta-analysis to evaluate the reliability of depth-to-water maps in predicting areas particularly sensitive to machinery-induced soil disturbance. Croatian Journal of Forest Engineering. 2024; 45 (2): 433–444. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.2559.
13. Mahura B., Bakay B., Bilous O., Karatnyk I., & Kiy V. Determining the optimal angle of traction force application of a «walking sledge» skidding device. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2023; 101 (2): 121-128.
14. Makunina Y. S., Dolmatov S. N., & Kolesnikov P. G. Operation of wheel skidders in conditions of insufficient ground bearing capacity. In A. A. Radionov & V. R. Gasiyarov (Eds.), Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023). Springer Cham; 2023. p. 122–130. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3.
15. Mergl V., Pandur Z., Klepárník J., Kopseak H., Bačić M., & Šušnjar M. Technical solutions of forest machine hybridization. Energies. 2021; 14 (10): 2793. – DOI: https://doi.org/10.3390/en14102793.
16. Muhdi, Lubis L. M., Purba B., Lintang D. P. S., Zaitunah A., Sahar A., & Hanafiah D. S. The effect of skidding by excavator on soil compaction in the industrial plantation forest of PT Toba Pulp Lestari, North Sumatra, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022; 977 (1): 012093. – DOI: 10.1088/1755-1315/977/1/012093.
17. Nieminen M., Pukkala T., Stenberg L., Sarkkola S., Vihonen A., & Valkeapää A. Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutus metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitukseen Suomessa. Metsätieteen aikakauskirja. 2023; 2023 (4): 22001. – DOI: 10.14214/ma.22001.
18. Nunes L. J. R., Nogueira J., Rodrigues J. B., Azevedo J. C., Oliveira E., de Figueiredo T., & Picos J. Modern Animal Traction to Enhance the Supply Chain of Residual Biomass. AgriEngineering. 2023; 5 (2): 1039-1050. – DOI: 10.3390/agriengineering5020065.
19. Presecan M. F., Forkuo G. O., & Borz S. A. Soil Compaction Induced by Three Timber Extraction Options: A Controlled Experiment on Penetration Resistance on Silty-Loamy Soils. Applied Sciences. 2024; 14 (12): 5117. – DOI: https://doi.org/10.3390/app14125117.
20. Prinz A., Engebretsen M., Gjøsæter T., Møller-Pedersen B., & Xanthopoulou T. D. Models, systems, and descriptions: A cross-disciplinary reflection on models. Frontiers in Computer Science. 2023; 5: 1031807. – DOI: 10.3389/fcomp.2023.1031807.
21. Riggert R., Fleige H., & Horn R. An assessment scheme for soil degradation caused by forestry machinery on skid trails in Germany. Soil Science Society of America Journal. 2019; 83 (S1): S1–S12. – DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0255.
22. Петросян С.С., Ильюшенко Д.А., Барышникова Е.В. и др. Оценка экологической совместимости колесных трелевочных тракторов с пачковым захватом с почвенно-грунтовыми условиями. Известия СПбЛТА. – 2022. – № 238. – С. 124-136. – DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.124-136.
23. Подрубалов М.В., Мехедов М.А. Особенности конструкции тракторов для работы на склонах. Наука в Центральной России. – 2023. – Т. 62, № 2. – С. 148-153. – DOI: https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-148-153.
24. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом / Е. Г. Хитров, И. С. Должиков, А. С. Дмитриев [и др.]. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 5(395). – С. 126-134. – DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-126-134.
25. Шапиро В.Я., Новиков М.С., Григорьев И.В., Перфильев П.Н., Тихонов Е.А., Друзьянова В.П. Оценка работоспособности трасс движения лесных машин на склоне оттаивающего почвогрунта с учетом маневрирования движителя. Хвойные бореальной зоны. – 2025. – Т. 43, № 2. – С. 77-84.

References

1. Abelev A., Merrick T., Liang R., Vermillion M., Li R.-R., Buma W., and Swanson C. Torque-Weighted Index Soil Strength Test (TWISST) for vegetated terrain. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-8418. 2023. DOI: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8418.
2. Baek K., Lee E., Choi H., Cho M., Choi Y., and Han S. Impact on Soil Physical Properties Related to a High Mechanization Level in the Row Thinning of a Korean Pine Stand. Land. 2022; 11 (3): 329. DOI: https://doi.org/10.3390/land11030329.
3. Bragar E., Pronozin Y., Zhussupbekov A., Gerber A., Sarsembayeva A., Muzdybayeva T., and Sarabekova U. Z. Evaluation of the Strength Characteristics of Silty-Clayey Soils during Freezing-Thawing Cycles. Applied Sciences. 2022; 12 (2): 802. DOI: https://doi.org/10.3390/app12020802.
4. Collet C., Agro C., Akroume E. et al. Mechanical site preparation impacts on soil structural quality in a forest plantation depend on soil moisture and excavator size. 19 June 2024. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4480823/v1.
5. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M. et al. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). Eurasian Soil Sc. 2022; 55: 1633–1646. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229322110023.
6. Erktan A., Or D., and Scheu S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. Soil Biology and Biochemistry. 2020; 148: 107876. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876.
7. Germer K., Shafiullah A. Z., Peters A., Kraft M., Weise M., Rolfes L., and Lorenz M. Field traffic loads on a silty farm site cause shifting and narrowing of soil pore size distribution. Soil and Tillage Research. 2025; 248: 106425. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106425.
8. Karami S., Latterini F., Jourgholami M. et al. The medium-term effects of forest operations on a mixed broadleaf forest: Changes in soil properties and loss of nutrients. Land Degradation & Development. 2023; 34 (10): 2961–2974. DOI: 10.1002/ldr.4660.
9. Karnaukhov I., Babin V., Ivanov A., Romanenko M., and Serebrennikov Y. Optimization of hydraulic drive parameters of caterpillar forest loader. E3S Web of Conferences. 2024; 525: 06013. DOI: 10.1051/e3sconf/202452506013.
10. Katarov V., Syunev V., and Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation. Forests. 2022; 13 (10): 1538. DOI: https://doi.org/10.3390/f13101538.
11. Labelle E. R., Borchert H., Aurenhammer P. K., Breinig L., and Spinelli R. Effect of season and machine type on performance of semi- and fully-mechanized harvesting systems in beech-dominated stands. Croatian Journal of Forest Engineering. 2024; 45 (2): 237–252. DOI: 10.5552/crojfe.2024.2281.
12. Latterini F., Venanzi R., Papa I., Duka A., and Picchio R. A meta-analysis to evaluate the reliability of depth-to-water maps in predicting areas particularly sensitive to machinery-induced soil disturbance. Croatian Journal of Forest Engineering. 2024; 45 (2): 433–444. DOI: 10.5552/crojfe.2024.2559.
13. Mahura B., Bakay B., Bilous O., Karatnyk I., and Kiy V. Determining the optimal angle of traction force application of a "walking sledge" skidding device. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2023; 101 (2): 121-128.
14. Makunina Y. S., Dolmatov S. N., and Kolesnikov P. G. Operation of wheel skidders in conditions of insufficient ground bearing capacity. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R., editors. Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023). Springer Cham; 2023. p. 122–130. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3.
15. Mergl V., Pandur Z., Kleparnik J., Kopseak H., Bacic M., and Susnjar M. Technical solutions of forest machine hybridization. Energies. 2021; 14 (10): 2793. DOI: https://doi.org/10.3390/en14102793.
16. Muhdi, Lubis L. M., Purba B., Lintang D. P. S., Zaitunah A., Sahar A., and Hanafiah D. S. The effect of skidding by excavator on soil compaction in the industrial plantation forest of PT Toba Pulp Lestari, North Sumatra, Indonesia.

IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022; 977 (1): 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/977/1/012093.
17. Nieminen M., Pukkala T., Stenberg L., Sarkkola S., Vihonen A., and Valkeapaa A. Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutus metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitukseen Suomessa. Metsätieteen aikakauskirja. 2023; 2023 (4): 22001. DOI: 10.14214/ma.22001.
18. Nunes L. J. R., Nogueira J., Rodrigues J. B., Azevedo J. C., Oliveira E., de Figueiredo T., and Picos J. Modern Animal Traction to Enhance the Supply Chain of Residual Biomass. AgriEngineering. 2023; 5 (2): 1039-1050. DOI: 10.3390/agriengineering5020065.
19. Presecan M. F., Forkuo G. O., and Borz S. A. Soil Compaction Induced by Three Timber Extraction Options: A Controlled Experiment on Penetration Resistance on Silty-Loamy Soils. Applied Sciences. 2024; 14 (12): 5117. DOI: https://doi.org/10.3390/app14125117.
20. Prinz A., Engebretsen M., Gjosæter T., Møller-Pedersen B., and Xanthopoulou T. D. Models, systems, and descriptions: A cross-disciplinary reflection on models. Frontiers in Computer Science. 2023; 5: 1031807. DOI: 10.3389/fcomp.2023.1031807.
21. Riggert R., Fleige H., and Horn R. An assessment scheme for soil degradation caused by forestry machinery on skid trails in Germany. Soil Science Society of America Journal. 2019; 83 (S1): S1–S12. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0255.
22. Petrosyan S.S., Ilyushenko D.A., Baryshnikova E.V. et al. Otsenka ekologicheskoy sovmestimosti kolesnykh trelevochnykh traktorov s pachkovym zakhvatom s pochvenno-gruntovymi usloviyami [Assessment of environmental compatibility of wheeled skidders with grapple with soil conditions]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Bulletin of Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2022; 238: 124-136. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.124-136.
23. Podrubalov M.V., Mekhedov M.A. Osobennosti konstruktsii traktorov dlya raboty na sklonakh [Features of the design of tractors for work on slopes]. Nauka v Tsentral'noy Rossii = Science in Central Russia. 2023; 62 (2): 148-153. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-148-153.
24. Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S. et al. Raschet koeffitsienta stsepleniya kolesnogo dvizhitelya lesnoy mashiny s pochyvogruntom [Calculation of the coefficient of adhesion of the wheeled mover of a forest machine with soil]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal. 2023; 5 (395): 126-134. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-126-134.
25. Shapiro V.Ya., Novikov M.S., Grigor'ev I.V., Perfil'ev P.N., Tikhonov E.A., Druzyanova V.P. Otsenka rabotosposobnosti trass dvizheniya lesnykh mashin na sklone ottayvayushchego pochyvogrunta s uchetom manevrirovaniya dvizhitelya [Assessment of the performance of forest machine routes on a slope of thawing soil taking into account the maneuvering of the mover]. Khvoynyye boreal'noy zony = Conifers of the boreal area. 2025; 43 (2): 77-84. (In Russ.).

Сведения об авторах

Шапиро Владимир Яковлевич - доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-6344-1239, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5574-1725, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Рыжов Ярослав Андреевич* – аспирант кафедры Промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» ORCID: https://orcid.org/ 0009-0000-8336-1124, e-mail: irosmagelav@mail.ru.

Тихонов Евгений Андриянович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2136-3268, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Перфильев Павел Николаевич – кандидат технических наук, зав. кафедрой лесопромышленных производств и обработки материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3041-7512, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Египко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины природообустройства» Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К.Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8356-7026, e-mail: egipko_s@mail.ru.

Information about the authors

Vladimir Ya. Shapiro – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, ORCID: https://orcid.org / 0000-0002-6344-1239, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Igor V. Grigorev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5574-1725, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Yaroslav A. Ryzhov* – graduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ORCID: https://orcid.org / 0009-0000-8336-1124, e-mail: irosmagelav@mail.ru.

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2136-3268, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Pavel N. Perfiliev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Timber Industry and Materials Processing of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3041-7512, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Sergey V. Egypko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Environmental Management Machines» A.K. Kortunov Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute - branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8356-7026, e-mail: egipko_s@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/26
УДК 630*674.8: 630.2: 519.85

Математическая модель определения объемов бересты на деревообрабатывающих предприятий при организации производства композиционных материалов

Александр С. Черных[1], ✉ as-umu@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1601-420X
Илья Ю. Рублев[1], ilya.rublev.2001@mail.ru https://orcid.org/0009-0009-7129-699X

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

В России на деревоперерабатывающих предприятиях ежегодно образуется около 5 млн м^3 березовой коры, которая практически не используется, в основном сжигается. Установлено, что перспективным направлением переработки коры березы является организация производства многофункциональных композиционных материалов, в том числе биопластиков из ее компонентов, в частности из бересты. Несмотря на созданные предпосылки в рамках различных НИОКР, данное направление не получило широкого развития, прежде всего из-за отсутствия точного инструмента оценки и прогнозирования количества и параметров бересты. Впервые публикуются обобщённые результаты исследований параметров коры березы пушистой на основании анализа 482 образцов с 16 модельных стволов различных диаметров, а также разработанная на их основе многослойная математическая модель (береста-кора-ствол), позволяющая наиболее точно оценивать объемы бересты и прогнозировать ее запасы на деревообрабатывающих предприятиях. Кроме того, проведен анализ изменения толщины коры и толщины бересты по длине ствола, а также их объемов в зависимости от диаметра, показывающий, что наибольшая толщина бересты и коры отмечается в комлевой части ствола 5,75 мм и 13,6 мм, а наименьшая в вершинной части 0,62 мм и 3,25 мм соответственно. У всех модельных стволов, которые были исследованы выявлена закономерность, что с увеличением диаметра увеличивается толщина бересты, а по месту взятия образцов по длине ствола от комля к вершине уменьшается. Установлено, что объем бересты и коры в зависимости от диаметра по длине ствола не соответствуют закономерностям, установленным при изменчивости их толщины: доля бересты и коры от объема древесины в комлевой части, составляет соответственно 1,54...4,31% и 6,5…12,4%, в срединной части на длине от 7 до 15 метров снижается до 0,85…1,45% и 3,9…7,1% соответственно, а в верхней четверти ствола наблюдается небольшое увеличение до значений 1,05…1,72% и 4,2…6,7% соответственно. При этом доля бересты от объема ствола березы пушистой составляет 2,56…3,84%, а на долю коры приходится 8,78…12,1%. Эти показатели зависят от параметров ствола дерева – диаметра и длины, и соответственно возраста. В основу многослойной математической модели (береста-кора-ствол) положено математическое описание образующей древесного ствола с помощью кубических сплайн-функций, заданных в параметрическом виде, что позволило получить многослойные 3-D модели каждого модельного ствола дерева и оценить объемы каждого слоя. Достоверность результатов составляет 98,1%. На основе разработанного программного обеспечения в среде Python был произведен анализ ряда крупных деревоперерабатывающих предприятий, перерабатывающих березу. Объем бересты от годовой программы предприятий колеблется от 2,58% до 3,74%, в абсолютных величинах доходят до нескольких тысяч и даже десятков тысяч тонн. Результаты исследований позволили прийти к выводу, что при готовой программе переработки более 20 тыс. м^3, организация

производства многофункциональных композиционных материалов, в том числе биопластиков из бересты будет эффективна. При этом требуется совершенствование и повышение эффективности технологии производства.

Ключевые слова: *древесные отходы, кора березы, береста, сплайн-функция, объем, композиционный материал, переработка*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Черных А.С. Математическая модель определения объемов бересты на деревообрабатывающих предприятий при организации производства композиционных материалов / А.С. Черных, И.Ю. Рублев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 437-455. – *Библиогр.: с. 453-455 (20 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/26.

Поступила 20.03.2025. ***Пересмотрена*** 22.09.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Mathematical model for determining the volume of birch bark at woodworking enterprises when organizing the production of composite materials

Alexander S. Chernykh[1], ✉ as-umu@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1601-420X

Ilya Y. Rublev[1], ilya.rublev.2001@mail.ru https://orcid.org/0009-0009-7129-699X

[1]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

In Russia, wood processing enterprises produce about 5 million m3 of birch bark every year, which is practically unused and is mostly burned. It has been established that a promising area for processing birch bark is the production of multifunctional composite materials, including bioplastics made from its components, such as birch bark. Despite the existing prerequisites for this development through various research and development projects, this area has not been widely pursued, primarily due to the lack of an accurate tool for assessing and predicting the quantity and characteristics of birch bark. For the first time, the generalized results of studies of the parameters of the downy birch bark are published based on the analysis of 482 samples from 16 model trunks of various diameters, as well as a multilayer mathematical model (birch bark-trunk) developed on their basis, which allows for the most accurate estimation of birch bark volumes and prediction of its reserves at woodworking enterprises. In addition, an analysis was conducted to determine the change in bark and birch bark thickness along the trunk length, as well as their volumes, depending on the diameter. The analysis showed that the highest thickness of birch bark and bark was observed in the base of the trunk, at 5.75 mm and 13.6 mm, respectively, while the lowest thickness was observed in the top of the trunk, at 0.62 mm and 3.25 mm, respectively. All of the model trunks that were studied showed a pattern in which the thickness of the birch bark increases with increasing diameter, and decreases along the length of the trunk from the base to the top. It has been established that the volume of birch bark and bark, depending on the diameter along the length of the trunk, does not correspond to the patterns established with the variability of their thickness: the proportion of birch bark and bark from the volume of wood in the lumpy part is 1.54...4.31% and 6.5...12.4%, respectively, in the middle part at a length of 7 to 15 meters decreases up to 0.85...1.45% and 3.9...7.1%, respectively, and in the upper quarter of the trunk there is a slight increase to values of 1.05...1.72% and 4.2...6.7%, respectively.

At the same time, the share of birch bark in the volume of the fluffy birch trunk is 2.56…3.84%, and the share of the bark is 8.78…12.1%. These indicators depend on the parameters of the tree trunk, such as diameter and length, and, accordingly, on the age of the tree. The basis of the multilayer mathematical model (birch bark-trunk) is a mathematical description of the tree trunk using cubic spline functions defined in a parametric form, which allowed us to obtain multilayer 3-D models of each model tree trunk and estimate the volumes of each layer. The reliability of the results is 98.1%. Based on the developed software in the Python environment, we analyzed a number of large birch processing enterprises. The volume of birch bark from the annual program of enterprises ranges from 2.58% to 3.74%, and in absolute terms it reaches several thousand and even tens of thousands of tons. The research results led to the conclusion that, with a ready-made recycling program of more than 20000 m^3, the production of multifunctional composite materials, including bio-plastics made from birch bark, will be effective. At the same time, it is necessary to improve and enhance the efficient production technology.

Keywords*: wood waste, birch bark, birch bark paper, spline function, volume, composite material, recycling*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: the authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Chernykh A.S., Rublev I.Y. (2025). Mathematical model for determining the volume of birch bark at woodworking enterprises when organizing the production of composite materials. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 437-455 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/26

Received 20.03.2025. ***Revised*** 22.09.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Актуальность

В контексте глобального перехода к принципам устойчивого развития и циркулярной экономики особую актуальность приобретают технологии рационального использования возобновляемых природных ресурсов [1]. Деревообрабатывающая промышленность Российской Федерации, обладающей крупнейшими в мире лесными ресурсами, сталкивается с необходимостью повышения эффективности переработки отходов, доля которых достигает 40-60% от объема исходной древесины [2]. Одним из перспективных, но недостаточно вовлеченных в хозяйственный оборот видов биомассы является береста - наружный покров коры березы.

Уникальный химический состав бересты, характеризующийся высоким содержанием бетулина, суберина и фенольных соединений, открывает широкие возможности для ее использования в производстве композиционных материалов и биологически активных веществ [3]. Однако организация рентабельного производства требует решения фундаментальной задачи - разработки достоверной математической модели определения объемов бересты. Точный прогноз сырьевой базы критически важен для планирования логистических цепочек, проектирования производственных мощностей и обоснования инвестиций в перерабатывающие линии [4].

Современные исследования демонстрируют значительный потенциал использования бересты в композиционных материалах. В работах [5, 6] показано улучшение термических и механических свойств полимерных композитов при введении модифицированной бересты, а исследования [7, 8] подтверждают возможность создания на ее основе биоразлагаемых материалов. Эти разработки формируют устойчивый рыночный спрос, актуализируя задачу точного прогнозирования объемов сырья.

Анализ существующих методик показывает, что, несмотря на наличие работ по определению доли коры в общем объеме ствола [9], береста как

специфический слой требует отдельного рассмотрения. Исследования [10, 11] детально изучают анатомическое строение и физико-химические свойства бересты, в то время как работы [12, 13] экспериментально исследуют изменение ее объема в зависимости от дендрометрических показателей.

В последнее десятилетие активно развиваются подходы к оптимизации раскроя и управления ресурсами на лесопромышленных предприятиях с использованием методов математического программирования [14, 15]. Однако эти модели преимущественно фокусируются на основном продукте, тогда как моделирование побочных продуктов, включая бересту, остается недостаточно разработанным.

Перспективным направлением является внедрение технологий цифровых двойников и лазерного сканирования [16-18], позволяющих с высокой точностью определять морфометрию бревен и служить источником данных для прецизионных моделей объема бересты. Исследования [19,20] в области логистики и управления качеством отходов также вносят значительный вклад в организацию берестяного сырьевого потока.

Анализ литературы свидетельствует о наличии значительного научного задела в смежных областях, однако комплексная математическая модель, предназначенная специально для прогнозирования объемов бересты на промышленном предприятии с учетом производства композиционных материалов, обладает научной новизной и практической значимостью.

Точный прогноз объемов сырья критически важен для планирования логистических цепочек, проектирования производственных мощностей, калькуляции себестоимости и, в конечном счете, для обоснования инвестиций в новые перерабатывающие линии. Существующие методы оценки носят зачастую эмпирический характер и не учитывают всего спектра влияющих факторов, что обуславливает необходимость разработки строгой математической модели, адаптированной к условиям конкретного деревообрабатывающего предприятия.

В частности, не учитывается нелинейный характер изменения морфометрических параметров березы по длине ствола, что приводит к значительной погрешности в расчетах валового выхода бересты.

В связи с этим разработка прецизионного инструмента для прогнозирования объемов данного вида сырья является научно-прикладной задачей, имеющей существенное значение для развития глубокой переработки древесных отходов.

Целью настоящей работы выступает разработка математической модели, предназначенной для прецизионной оценки объемов бересты и прогнозирования ее сырьевого потенциала на деревообрабатывающих предприятиях в контексте технико-экономического обоснования производства композиционных материалов. Ключевой задачей в рамках достижения поставленной цели является установление регрессионных зависимостей толщины бересты от диаметра ствола и его продольной координаты.

Материалы и методы

Объектом исследования служила береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) – типичный представитель лесных формаций европейской части России. Изучался пробковый слой коры (береста), отбираемый по всей длине ствола с деревьев диаметром от 12 до 44 см.

Заготовка образцов проводилась во время рубок ухода в Воронежском лесничестве. Для получения репрезентативных данных о пространственном распределении толщины и объема бересты было отобрано 16 модельных деревьев, охватывающих весь спектр товарных размеров древесины.

Отбор проб осуществлялся по специально разработанной схеме, предусматривающей взятие образцов коры (береста с лубом) на различных высотах: 0,5 м, 2,0 м и далее с 4-метровым интервалом по всей длине ствола. В каждом поперечном сечении пробы отбирались в пяти равноотстоящих точках по окружности ствола. Параллельно проводились замеры диаметров ствола

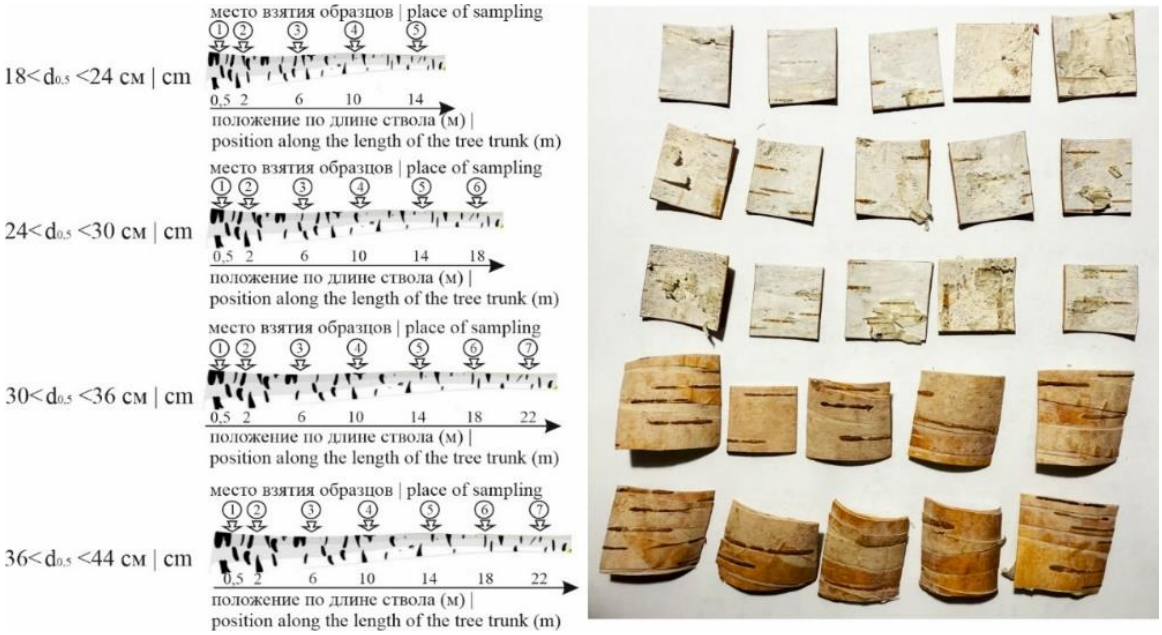
в точках отбора проб. Стандартный размер образцов составлял 30×30 мм.

Общий объем экспериментального материала включил 482 образца, отобранных с 16 модельных деревьев (рис.1.). Все образцы прошли стандартную процедуру кондиционирования до воздушно-сухого состояния. Разработанная методика обеспечивает получение статистически достоверных данных о пространственной изменчивости характеристик бересты в зависимости от положения на стволе и таксационных показателей дерева.

Для обеспечения высокой точности измерений диаметра ствола в точках отбора образцов использовалась электронная мерная вилка Haglof Digitech DP II, оснащенная линейкой SmartScale. Измерительная система

характеризовалась диапазоном измерений от 0 до 500 мм с точностью ±1 мм. Регистрация и обработка данных осуществлялись с помощью карманного персонального компьютера со специализированным программным обеспечением, что обеспечивало автоматизированный сбор и документирование результатов.

Определение толщины образцов бересты проводилось с применением универсального цифрового микрометра «Кобальт», обеспечивающего измерения в диапазоне 0-25 мм с точностью 0,001 мм. Высокая точность измерительного прибора позволяла достоверно фиксировать пространственную изменчивость толщины бересты как вдоль ствола, так и по его окружности. Репрезентативная выборка результатов измерений представлена в таблице 1.



а) | a) б) | b)

Рисунок 1. Размерный план модельных стволов деревьев для заготовки образцов коры (а) и примеры образцов бересты (б)

Figure 1. Dimensional plan of model tree trunks for collecting bark samples (a) and examples of birch bark samples (b)

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition



а) | a)



б) | b)



в) | c)



г) | d)

Рисунок 2. Примеры поперечных срезов образцов коры березы (береста и луба) полученных на расстоянии 0,5 м от комля: а) при диаметре 21,2 см; б) при диаметре 24,6 см; в) при диаметре 28,1 см; г) при диаметре 36,8 см.

Figure 2. Examples of cross-sections of birch bark samples (birch bark and bast) obtained at a distance of 0.5 m from the base: a) with a diameter of 21.2 cm; b) with a diameter of 24.6 cm; c) with a diameter of 28.1 cm; d) with a diameter of 36.8 cm.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 1

Table 1

Фрагмент результатов измерений толщины образцов бересты и коры, диаметров березы пушистой по длине ствола (Модельный ствол №8)

Fragment of the results of measurements of the thickness of birch bark samples and the diameters of fluffy birch along the trunk length (Model tree trunk No. 8)

Положение по длине ствола для взятия образцов, м | Position along the tree trunk for taking samples, m	Диаметр ствола (см)/толщина бересты (мм)/толщина коры (мм) | Tree trunk diameter (cm)/birch bark thickness (mm)/bark thickness (mm)				
	1 образец (0 град.) | 1 sample (0 degrees)	2 образец (72 град.) | 2 sample (72 degrees)	3 образец (144 град.) | 3 sample (144 degrees)	4 образец (216 град.) | 4 sample (216 degrees)	5 образец (288 град.) | 5 sample (288 degrees)
0,5	43,5	43,1	43,6	42,9	42,6
	5,70	5,64	5,56	5,49	5,41
	13,31	13,21	13,08	12,96	12,86
2	38,5	38,2	38	37,8	37,7
	3,75	3,72	3,71	3,7	3,68
	12,31	12,26	12,14	12,08	11,89
6	31,1	30,8	30,6	30,4	30,5
	2,55	2,52	2,5	2,48	2,5
	9,54	9,48	9,42	9,4	9,44

10	27,3	27	27	27,1	26,9
	2,14	2,1	2,11	2,11	2,1
	7,22	7,09	7,12	7,14	7,11
14	22,6	22,4	22,4	22,3	22,3
	1,69	1,67	1,66	1,66	1,65
	6,85	6,76	6,75	6,69	6,7
18	19,4	19,2	19,2	19,3	19,2
	1,44	1,41	1,42	1,42	1,41
	5,76	5,72	5,7	5,73	5,7
22	16,8	16,6	16,5	16,6	16,4
	1,14	1,12	1,11	1,11	1,12
	4,1	4,06	4,08	4,08	4,07

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Методы измерений и оборудование

Экспериментальные исследования выполнены в искусственно созданном насаждении березы пушистой. Следует отметить, что если пространственная изменчивость толщины коры у березы повислой достаточно хорошо изучена и имеются методики прогнозирования запасов бересты для этой породы, то для березы пушистой аналогичные исследования ранее не проводились. Данный вид обладает рядом преимущественных характеристик: более протяженной бессучковой зоной, шарообразной формой кроны с малым количеством сучьев, а также минимальной склонностью к искривлению стволов, что представляет особую ценность для фанерного производства.

Обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием комплекса программных средств. Первичная обработка и статистический анализ данных измерений толщины бересты проводились в среде MS Excel. Для построения трехмерных моделей стволов и расчета объемов структурных компонентов применялось программирование на Python с использованием сплайн-функций, что позволило с высокой точностью аппроксимировать геометрические характеристики древесных стволов.

Многоуровневая математическая модель "береста-кора-ствол"

Для математического описания сложной геометрии древесного ствола разработана многоуровневая модель, основанная на применении сплайн-аппроксимации. В качестве математического аппарата использованы кубические сплайны, позволяющие с высокой точностью описывать как поперечные сечения ствола, так и его продольную образующую. Особенностью подхода является сохранение гладкости кривых и обеспечение непрерывности изменения кривизны по всей длине ствола.

Управление геометрической формой осуществляется через систему параметрических элементов, включающих контрольные точки и управляющие многоугольники. Данный подход обеспечивает гибкость в описании сложных поверхностей древесного ствола и позволяет точно учитывать его природную изменчивость.

Построение трехмерной геометрической модели

Трехмерное моделирование поверхности ствола реализовано на основе бикубических сплайнов. Модель представляет собой двустороннюю поверхность цилиндрического типа с замкнутой направляющей. Геометрическая структура задается регулярной сеткой контрольных точек, формирующей точечный каркас поверхности. Такой подход позволяет адекватно воспроизводить сложную морфологию древесного ствола и

проводить точный расчет объемов его структурных компонентов, включая бересту и кору.

Можно считать, что она представлена своим точечным каркасом - матрицей значений:

$$\|z_{ij}\|; i = 1,2, \dots, N; j = 1,2 \dots, M, (1)$$

заданных регулярным образом в узлах сетки

$$\Delta = \Delta x + \Delta y; \quad (2)$$

$$\Delta x: a = x_1 < x_2 < \dots < x_n = b; \quad (3)$$

$$\Delta y: a = y_1 < y_2 < \dots < y_n = d. \quad (4)$$

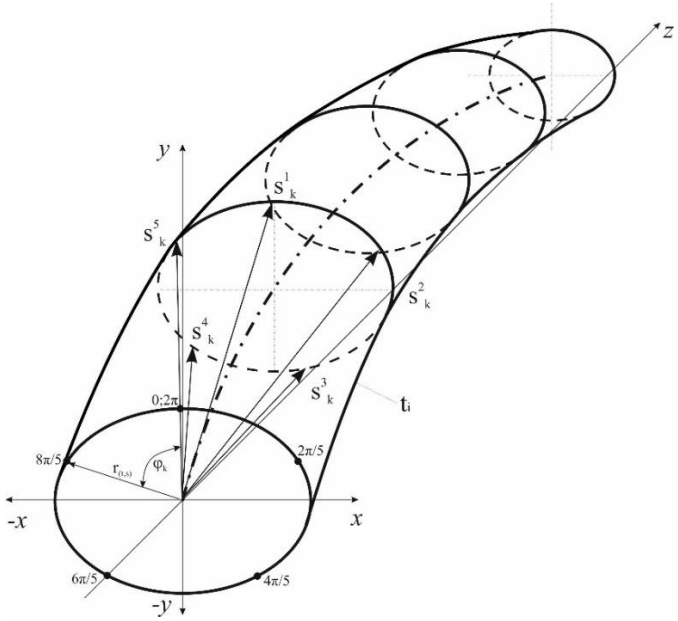


Рисунок 3. Графическое представление сплайн-функции для описания поверхностей ствола дерева.

Figure 3. Graphical representation of a spline function for describing the surfaces of a tree trunk

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Точечный каркас поверхности может быть образован одним из простейших способов, когда сетка Δ и матрица представляют собой значения прямоугольных декартовых координат, соответствующих точкам поверхности. Этот способ задает направление двух семейств координат линий: первое образовано замкнутыми линиями поперечных сечений s_k, второе состоит из образующих боковой поверхности ствола дерева t_i (рис. 3). Если значения точечного каркаса получены из точных измерений, то естественным способом аппроксимации таких данных является интерполяция в виде сплайна.

Так как, геометрическая модель поверхности ствола дерева относится к замкнутым поверхностям, то точнее и удобнее будет использовать ее параметрическое представление:

Так как, геометрическая модель поверхности ствола дерева относится к замкнутым поверхностям, то точнее и удобнее будет использовать ее параметрическое представление:

$$\vec{r}(t,s) = \begin{bmatrix} x(t,s) \\ y(t,s) \\ z(t,s) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $t \in [0,1]$ – нормированная в относительных величинах координата вдоль длины ствола (ось z); $s \in [0, 2\pi]$ – угловая координата на поперечном сечении (ось x, y); $r(t,s)$ – радиус ствола в точке получения образцов.

Последовательность параметризации поверхности, заданной узлами точечного каркаса, представлена следующим образом.

Проводится нормализация координаты z в диапазоне $t \in [0,1]$:

$$t_i = \frac{z_i}{L} \in [0,1]. \quad (6)$$

Таким образом, все точки взятия образцов представляют дискретные значения функции $r(t,s)$ на сетке $r(t_i, s_k) = r_i$.

Формируются сплайн-функции поперечных сечений ствола по длине z:

$$S_k = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\},$$

(7)

где x, y – координаты сечения на уровне z-k.

С учетом, что для каждого угла φ выполняется условие:

$$\varphi_k \in \left\{0, \frac{2\pi}{5}, \dots, \frac{8\pi}{5}\right\}. \quad (8)$$

Строим функцию $r(t,s)$, интерполированную по сетке точек (t_i, φ_k). Формируем систему декартовых координат:

$$\vec{r}(t,s) = \begin{cases} x(t,s) = r(t,s)\cos s; \\ y(t,s) = r(t,s)\sin s; \\ z(t,s) = L \cdot t. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, поверхность ствола формируется вращением радиуса вокруг оси ствола z с плавным изменением вдоль t.

Далее представим многослойную модель: береста – кора – ствол. Каждому слою соответствует своя сплайн-функция радиуса и длины:

$r_{\text{ст}}(t,s)$ – радиус ствола в коре;

$r_{\text{к}}(t,s) = r_{\text{ст}}(t,s) - h_{\text{к}}(t,s)$ – радиус коры или радиус ствола без коры;

$r_{\text{б}}(t,s) = r_{\text{ст}}(t,s) - h_{\text{б}}(t,s)$ – радиус бересты или радиус ствола без бересты.

Тогда модель имеет три вложенные поверхности:

$$\vec{r}_{\text{ст}}(t,s),\ \vec{r}_{\text{к}}(t,s),\ \vec{r}_{\text{б}}(t,s). \quad (10)$$

Объем каждой из вложенных моделей определяется исходя, что фигуры образованы вращением кривой $r(t)$ вокруг оси ствола z. Представим его интегралом по параметрической поверхности:

$$V = \iint\limits_{(t,s)\in[0,1]\times[0,2\pi]}^{L} \left(r(t,s)^2 \cdot \frac{L}{2}\right) dt\, ds, \quad (11)$$

где $r^2 \cdot dz = r^2 \cdot L dt$.

Данная модель была реализована в среде программирования Python.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный анализ экспериментальных данных выявил устойчивые закономерности в распределении толщины коры и бересты по длине ствола березы пушистой (рис. 4). Установлено, что толщина обоих параметров демонстрирует выраженную зависимость от диаметра ствола и положения по его длине. Наблюдается постепенное уменьшение толщины коры и бересты от комлевой части к вершине дерева.

Важным результатом является выявление относительной однородности распределения толщины по окружности ствола. Колебания значений в пяти контрольных точках отбора проб не превышают 6,4%, что свидетельствует о равномерности формирования коры и бересты по периметру ствола.

На рисунке 5 представлены установленные зависимости толщины бересты и коры от диаметра и местоположения по длине ствола, а на рисунке 6 ъпоказаны обобщенные зависимости для всей совокупности исследованных модельных стволов.

Статистическая обработка массива экспериментальных данных, включающего 486 образцов и 2430 отдельных измерений, подтвердила воспроизводимость выявленных закономерностей для всей выборки модельных деревьев. Полученные зависимости позволяют с достаточной для практических целей точностью прогнозировать объемы бересты на основе таксационных показателей деревьев.

Комплексный анализ экспериментальных данных выявил четкие закономерности в распределении толщины коры и бересты по длине ствола. Как показывает комплексный график (рис. 6), зависимость толщины бересты от диаметра и положения по длине ствола имеет нелинейный характер и успешно описывается степенной функцией. Наблюдается значительное изменение толщины бересты и коры по длине ствола - от максимальных значений 5,75 мм и 13,6 мм в комлевой части до минимальных 0,62 мм и 3,25 мм в вершинной соответственно. У всех исследованных модельных деревьев прослеживается устойчивая тенденция увеличения толщины бересты с ростом диаметра ствола при одновременном ее уменьшении по направлению от комля к вершине. Характерной особенностью является локальное увеличение толщины в зоне расположения сучков. Полученные

зависимости позволяют с высокой достоверностью прогнозировать объемы бересты на основе дендрометрических показателей деревьев, что имеет важное значение для организации промышленной переработки данного вида сырья.

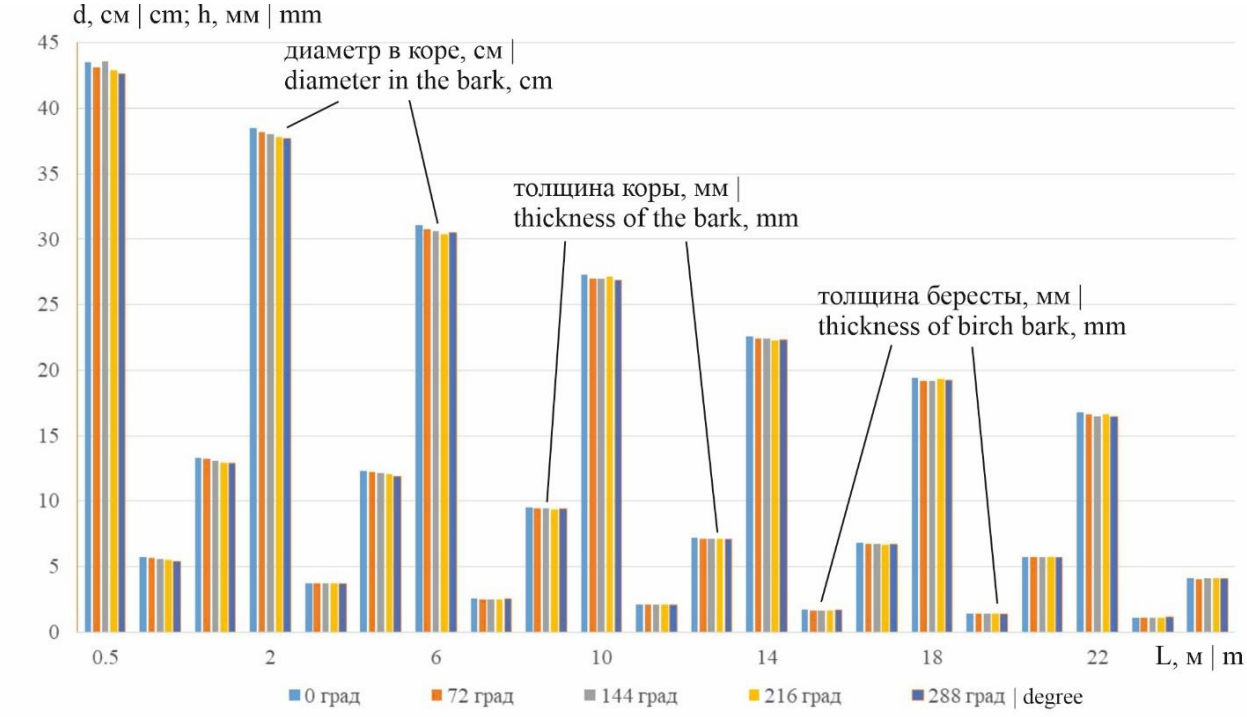


Рисунок 4. Изменение диаметра в коре, толщины коры и толщины бересты по длине ствола березы пушистой (модельный ствол №8)

Figure 4. Changes in bark diameter, bark thickness, and birch bark thickness along the length of a downy birch trunk (model trunk No. 8)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Зависимость толщины бересты от диаметра ствола описывается следующим уравнением, полученным на основе регрессионного анализа данных модельных стволов

$$y = 0{,}00002x^4 - 0{,}0013x^3 + 0{,}0317x^2 - 0{,}1892x \quad (12)$$

Данная функция отражает указанную зависимость с высокой точностью, коэффициент аппроксимации равен 0,981.

Для количественной оценки объемов бересты, коры и древесины была применена разработанная методика трехмерного моделирования. В результате реализации данного подхода получены многослойные 3D-модели каждого модельного ствола, представленные в нормализованном виде (рисунок 7).

Использование нормализованных моделей позволяет проводить сравнительный анализ пространственного распределения объемов структурных компонентов для деревьев различного диаметра и таксационных характеристик. Данный подход обеспечивает точное определение объемных показателей бересты как сырьевого ресурса для последующей переработки в композиционные материалы.

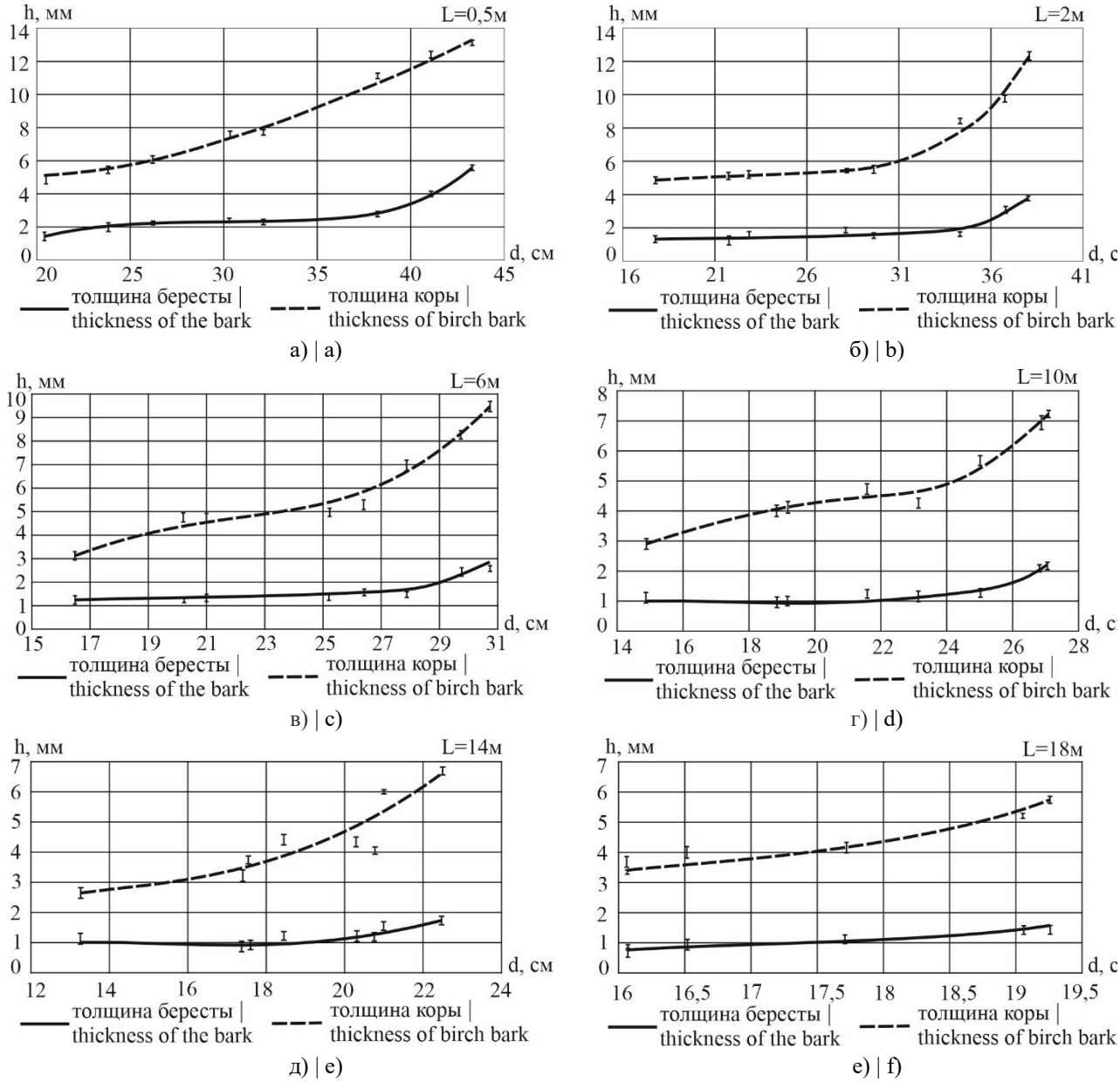


Рисунок 5. Графики зависимости толщины бересты и толщины коры от диаметра и местоположения по длине ствола: а) длина 0,5 м; б) длина 2,0 м; в) длина 6,0 м; г) длина 10,0 м; д) длина 14,0 м; е) длина 18,0 м.

Figure 5. Graphs of the dependence of birch bark thickness and bark thickness on diameter and location along the trunk length: a) length of 0.5 m; b) length of 2.0 m; c) length of 6.0 m; d) length of 10.0 m; e) length of 14.0 m; f) length of 18.0 m.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author’s composition

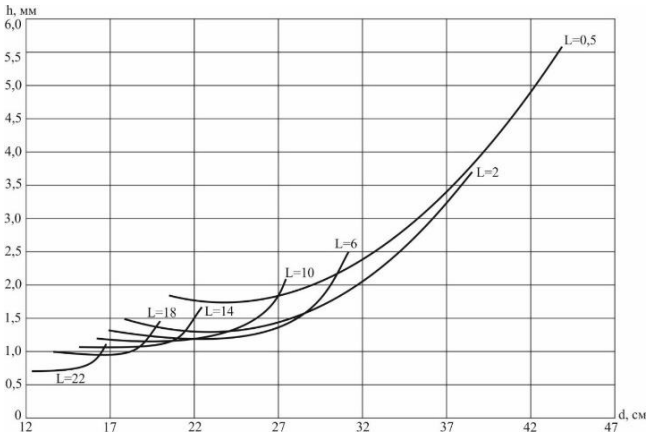


Рисунок 6. График зависимости толщины бересты от диаметра и места взятия образцов по длине ствола березы пушистой

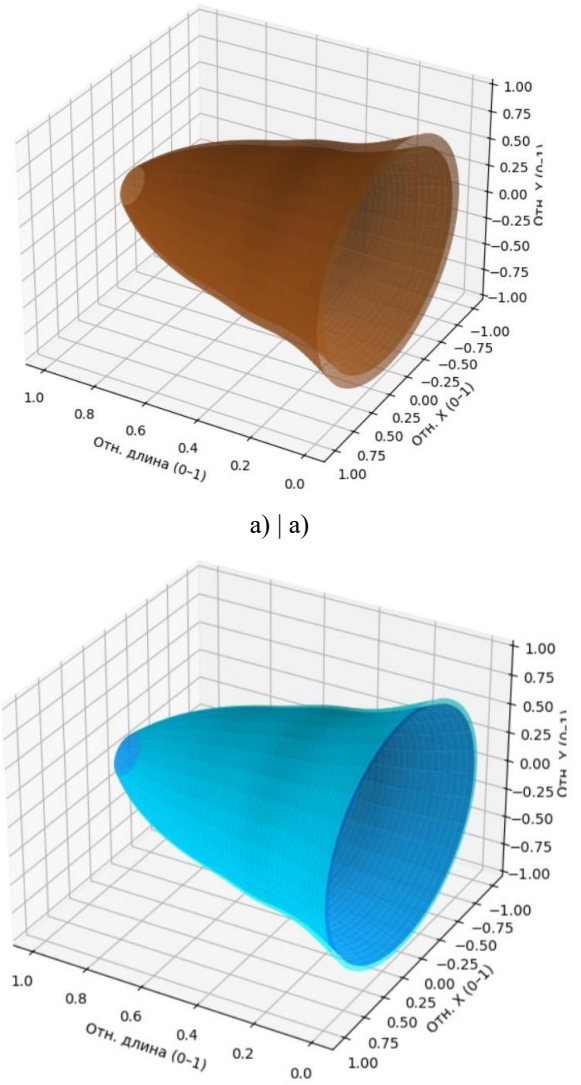
Figure 6. Graph of the dependence of birch bark thickness on the diameter and location of samples taken along the length of the fluffy birch trunk

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition

Установлено, что объем бересты и коры в зависимости от диаметра по длине ствола не соответствуют закономерностям, установленным при изменчивости их толщины: доля бересты и коры от объема древесины в комлевой части, составляет соответственно 1,54...4,31% и 6,5…12,4%, в срединной части на длине от 7 до 15 метров снижается до 0,85…1,45% и 3,9…7,1% соответственно, а в верхней четверти ствола наблюдается небольшое увеличение до значений 1,05…1,72% и 4,2…6,7% соответственно. Минимальное значение наблюдается в средней части бессучковой зоны: бересты 0,85% и коры 3,9%. Этот показатель выше в 2 раза в комлевой части ствола.

Доля бересты от объема ствола березы пушистой составляет 2,56…3,84%, а на долю коры приходится 8,78…12,1%. (табл. 2) Эти показатели зависят от параметров ствола дерева – диаметра и длины, и соответственно возраста. Кроме того, как указано в исследованиях [1, 19, 20, 21, 22] на толщину бересты и изменчивость ее по длине ствола также оказывают определенное влияние условия произрастания и бонитет насаждения.



а) | a)

б) | b)

Рисунок 7. Примеры многослойной трехмерной модели ствола березы в относительных величинах, а) ствол и кора (береста и луб); б) ствол и береста.

Figure 7. Examples of a multi-layered three-dimensional model of a birch trunk in relative terms: a) trunk and bark (birch bark and bast); b) trunk and birch bark.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результаты указанных исследований в обобщенном виде также были учтены при создании программного обеспечения.

Таблица 2
Table 2

Доля объема бересты и коры от объема ствола дерева березы пушистой
The ratio of birch bark and wood to the volume of the birch tree trunk

№ модели| № models	$V_{хл}$, м^3	$\varphi_К$, %	$\varphi_Б$, %
1	0.304	8,78	2,56
2	0,311	8,81	2,72
3	0.438	8,85	2,68
4	0,441	8,94	2,96
5	0,461	8,98	3,02
6	0.596	8,60	2,86
7	0.851	9,15	3,11
8	0,882	9,24	3,02
9	0.981	8,98	3,28
10	1,030	9,42	3,32
11	1.186	9,69	3,40
12	1,230	10,12	3,48
13	1,378	10,70	3,56
14	1,406	11,23	3,65
15	1,474	11,72	3,63
16	1,488	12,10	3,84

где $V_{хл}$ - объем ствола (хлыста) м^3; $\varphi_К$ – объемная доля коры, %; $\varphi_Б$ – объемная доля бересты, %.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

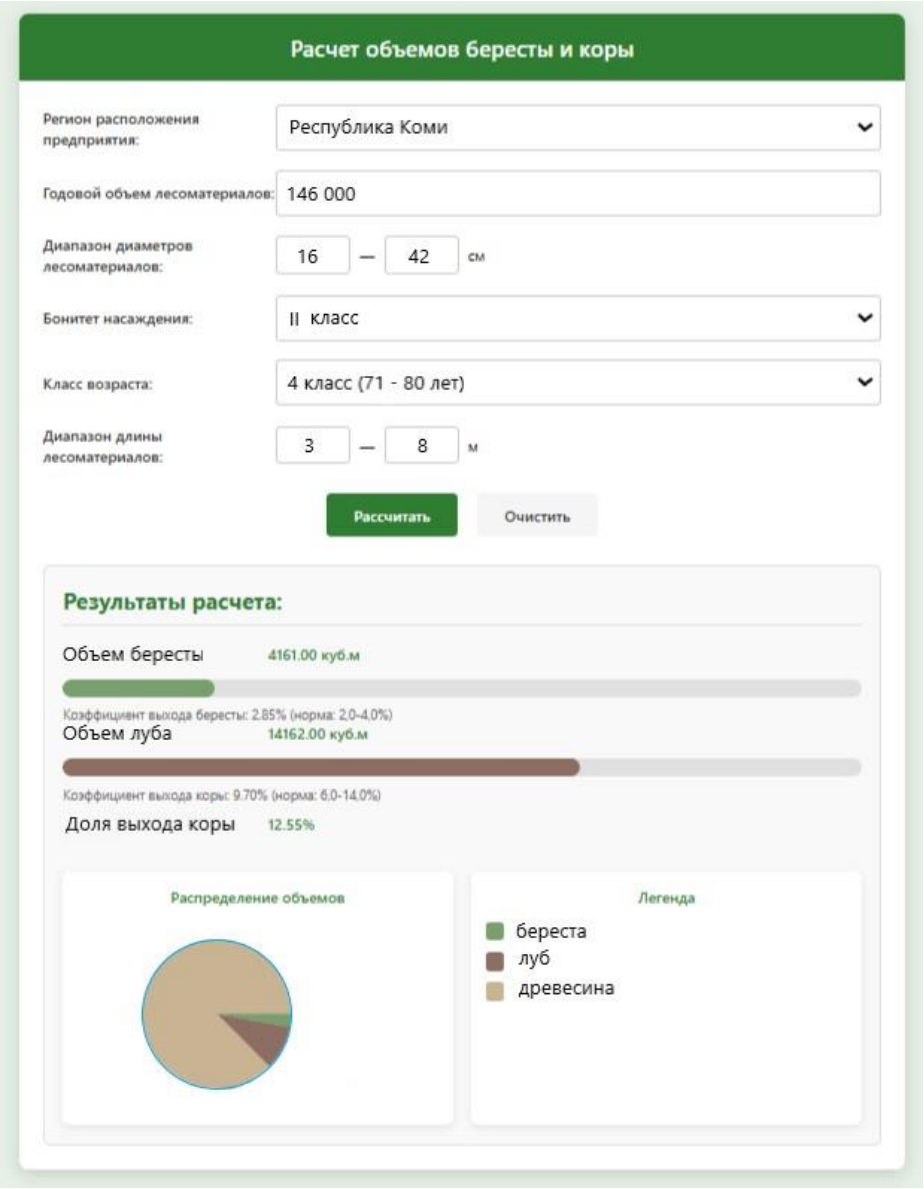


Рисунок 8. Интерфейс программы по расчету объемов бересты и коры на предприятиях
Figure 8. Interface of the program for calculating the volumes of birch bark and wood in enterprise

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таким образом, была разработана и реализована в среде программирования Python математическая модель для определения объемов бересты, коры и древесины. Интерфейс программы представлен на рисунке 8. В качестве основных входных параметров модели используются: объем переработки, диаметральный ряд лесоматериалов, их длина, а также бонитет и класс возраста насаждений.

Применение данного программного обеспечения позволяет осуществлять моделирование и прогнозирование объемов бересты и коры для предприятий березоперерабатывающего комплекса Российской Федерации.

На основе разработанной модели проведен анализ потенциала образования отходов коры и бересты на крупнейших деревоперерабатывающих предприятиях, специализирующихся на переработке березы. Следует отметить, что в России функционирует более 60 фанерных производств, из которых 31 относится к категории крупных. Наибольшие объемы производства фанеры сосредоточены в Приволжском федеральном округе (33,2% от общероссийского объема), за которым следуют Северо-Западный (32,3%) и Центральный (23,4%) федеральные округа.

В таблице 3 систематизированы расчетные объемы отходов в виде коры и бересты для ведущих предприятий березоперерабатывающей отрасли.

Анализ данных по объемам отходов в виде коры березы показывает, что объем коры в общем объеме сырья составляет от 9,2% до 13,5%, объем бересты от годовой программы предприятий колеблется от 2,58% до 3,74%. Как видно из таблицы 3 объем бересты по каждому предприятию доходят до нескольких тысячи и даже десятков тысяч тонн, которые не используются и в основном сжигаются.

Таблица 3

Table 3

Объемы бересты по ведущим предприятиям России, перерабатывающим березу

Amounts of birch bark at Russia's leading birch processing enterprises

Предприятие | Company	Годовая программа по сырью, тыс. м^3 | Annual raw material program, thou. m^3	Объем коры, тыс. м^3 | The volume of the bark, thou. m^3	Масса коры, тонн | The mass of the bark, tons	Объем бересты, тыс.м^3 | The volume of birch bark, thou. m^3	Масса бересты, тонн | The mass of birch bark, tons	Объемный выход бересты от годовой программы, % | Volume output of birch bark from the annual program, %
Группа «СВЕЗА» | The Group «SVEZA»	1340	174,2	97552	50116	28064,9	3,74
Холдинг «Илим Тимбер» | Holding «Ilim Timber»	310	38,44	21526,4	10044	5624,6	3,24
ОАО «Фанплит» | JSC «Fanplit»	210	25,2	14112	5418	3034,1	2,58
Сыктывкарский фанерный завод (СФЗ) | Syktyvkar Plywood Factory (SPF)	252	28,98	16228,8	7282,8	4078,4	2,89
Жешартский фанерный завод | Zheshtarsky Plywood Factory	240	28,08	15724,8	7464	4179,8	3,11
Производственный холдинг «СтарВуд» | Production Holding «StarWood»	210	23,31	13053,6	5544	3104,6	2,64

ООО «Пермский фанерный комбинат» | LLC «Perm Plywood Mill»	345	43,815	24536,4	10039,5	5622,1	2,91
ЗАО «Муромский фанерный завод» | CJSC «Murom Plywood Factory»	195	21,06	11793,6	6084	3407,1	3,12
ООО «Демидовский фанерный комбинат» | LLC «Demidov Plywood Mill»	160	16,32	9139,2	5136	2876,2	3,21
ООО «Брянский фанерный комбинат» | LLC «Bryansk Plywood Mill»	230	24,84	13910,4	6532	3657,9	2,84
ЗАО «Семеновский фанерный завод» | CJSC «Semenovsky Plywood Factory»	21	2.27	1270,1	785,4	439,8	3,74

Выводы

1. Перспективным направлением утилизации древесных отходов, в частности, коры березы, является организация производства многофункциональных композиционных материалов, включая биопластики, из бересты, характеризующихся высокой добавленной стоимостью.
2. Обобщение результатов исследований параметров коры березы пушистой (*Betula pubescens*) на основе анализа 482 образцов, отобранных с 16 модельных стволов различного диаметра, позволило установить нелинейный характер изменения толщины коры и бересты по длине ствола. Максимальные значения толщины зафиксированы в комлевой части: 5,75 мм для бересты и 13,6 мм для коры. Минимальные значения наблюдаются в вершинной части: 0,62 мм и 3,25 мм соответственно.
3. Установлено, что распределение объемов бересты и коры по длине ствола не коррелирует с выявленной изменчивостью их толщины. Доля бересты от объема древесины в комлевой части составляет 1,54–4,31%, доля коры — 6,5–12,4%. В срединной части ствола (на участке от 7 до 15 метров) данные показатели снижаются до 0,85–1,45% для бересты и 3,9–7,1% для коры. В верхней четверти ствола отмечается незначительное увеличение доли до 1,05–1,72% (береста) и 4,2–6,7% (кора).
4. Суммарная доля бересты от объема ствола колеблется в интервале 2,56–3,84%, доля коры — 8,78–12,1%. Установлена зависимость данных показателей от таксационных параметров дерева: диаметра, длины и возраста.
5. Разработана многослойная математическая модель «береста-кора-ствол», основанная на математическом описании образующей древесного ствола с применением кубических сплайн-функций, заданных в параметрическом виде. Модель обеспечивает высокоточную оценку объемов бересты и прогнозирование ее ресурсов на деревообрабатывающих предприятиях с достоверностью 98,1%.
6. На основе многослойной модели и обобщенных данных разработан программный комплекс в среде Python. Апробация программного обеспечения на ряде крупных деревоперерабатывающих предприятий показала, что выход бересты от годового объема переработки составляет 2,58–3,74%, что в абсолютном выражении может достигать нескольких тысяч и десятков тысяч тонн.
7. На основании результатов исследований сделан вывод, что организация производства многофункциональных композиционных материалов и биопластиков из бересты экономически целесообразна для предприятий с объемом переработки свыше 20 тыс. м³ в год.
8. Перспективные задачи дальнейших исследований лежат в области совершенствования и повышения эффективности технологии производства многофункциональных композиционных материалов, в том числе биопластиков, на основе бересты.

Список литературы

1. Savov V, Antov P, Zhou Y, Bekhta P. Eco-Friendly Wood Composites: Design, Characterization and Applications. Polymers (Basel). 2023 Feb 10;15(4):892. doi: 10.3390/polym15040892. PMID: 36850175; PMCID: PMC9966963.
2. Zyryanov, Mikhail & Medvedev, Sergei & Stupak, Pavel & Khvostov, Alexey. (2023). Analysis of the rationality of using a natural resource in the form of wood biomass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1231. 012071. 10.1088/1755-1315/1231/1/012071.
3. Leontiev L.L., Morskoy-Lemeshko P.D., Eltsova L., Vedernikov D.N. Chemical composition and mechanical properties of various parts of birch wood. Journal of Chemistry and Petroleum Engineering. 2022;56(4):589-602. DOI: 10.14258/jcprm.20220411045
4. Thurner T., Kuzminov I., Lobanova P. The Russian forest industry: declining wood production and emerging opportunities in bioenergy. Biofuels. 2022;13(7):845-857. DOI: 10.1080/17597269.2022.2144761
5. Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Birchwood pre-hydrolytic treatment effect on physical and mechanical characteristics of composite material obtained on its basis. Forestry Bulletin. 2022;26(4):103-112. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-103-112
6. Rudykh L.G., Khomich N.V. Problems and prospects of low-rise construction in Eastern Siberia in 2020-2021. AIP Conference Proceedings. 2022;2456:020013. DOI: 10.1063/5.0091611
7. Arefieva S.A., Vavilova V.V. Unique application of composite materials in modern science and technology. Modern Science. 2022;4:41-47. DOI: 10.47813/mip.4.2022.4.41-47
8. Zhukov A., Stepina I., Bazhenova S., Sodomon M. Preliminary optimization of composite compositions based on modified Sosnowsky's Heracleum. BioResources. 2024;19(3):5731-5740. DOI: 10.15376/biores.19.3.5731-5740
9. Gorbunova V., Menshikov S. The Chemical Composition of Birch Leaves and the Vital State of Birch Stands in the Gradient of Aerotechnogenic Emissions of JSC "Karabashmed". Environmental Research. 2023;216:114432. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114432
10. Platonov A., Novikov A., Kantyeva E.V., Snegireva S., Novikova T., Drapalyuk M. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. Forests. 2022;13(11):1758. DOI: 10.3390/f13111758
11. Safina A., Safin R.G., Valeev K.V., Nazipova L.R., Solov'eva E.N. Mathematical description of birch bark impregnation and heating process of birch bark with toluene. E3S Web of Conferences. 2023; 413:06007. DOI: 10.1051/e3sconf/202341306007
12. Medvedev S.P., Yakusheva M., Dudin P. A model for improving the efficiency of forest industry enterprises in the context of rational environmental management. BIO Web of Conferences. 2024; 108:14004. DOI: 10.1051/bioconf/202410814004
13. Krivorotova A.I., Usoltsev O.A. Study of the possibility of using biomass coniferous in the production of composite materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2023; 1230:012011. DOI: 10.1088/1757-899X/1230/1/012011
14. Dolmatov S., Scherbakov A., Tsubiks V., Zhadan O., Sayfutdinova A., Sakhapov R. Increasing the efficiency of design in CAD CAE systems based on the application of parametrization methods. BIO Web of Conferences. 2024; 105:05010. DOI: 10.1051/bioconf/202410505010
15. Kunickaya O., Levushkin D., Voronova A., Storodubtseva T., Kruchinin I., Pomiguev A., Borisov V.M., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals. Forests. 2023;14(8):1543. DOI: 10.3390/f14081543
16. Zyryanov M., Yakusheva M.O. The introduction of modern woodworking equipment into the logging process as a tool to improve environmental management. BIO Web of Conferences. 2024;1 08:14005. DOI: 10.1051/bioconf/202410814005

17. Saveliev Y. Biotechnological potential of the forest regions of Russia and a feasibility study for integrated processing of forest biotechnological resources. Forestry Bulletin. 2022;26(2):45-53. DOI: 10.15862/02nzor122
18. Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2024). Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review. *Sensors*, *24*(10), 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117
19. Reinprecht L., Iždinský J. Composites from Recycled and Modified Woods – Technology, Properties, Application. MDPI Books. 2023;210 p. DOI: 10.3390/books978-3-0365-3108-3
20. Wenig C., Berendt F., Burgert I. et al. Adhesives free bark panels: An alternative application for a waste material. PLoS ONE. 2023;18(3): e0280721. DOI: 10.1371/journal.pone.0280721

References

1. Savov V, Antov P, Zhou Y, Bekhta P. Eco-Friendly Wood Composites: Design, Characterization and Applications. Polymers (Basel). 2023 Feb 10;15(4):892. doi: 10.3390/polym15040892. PMID: 36850175; PMCID: PMC9966963.
2. Zyryanov, Mikhail & Medvedev, Sergei & Stupak, Pavel & Khvostov, Alexey. (2023). Analysis of the rationality of using a natural resource in the form of wood biomass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1231. 012071. 10.1088/1755-1315/1231/1/012071.
3. Leontiev L.L., Morskoy-Lemeshko P.D., Eltsova L., Vedernikov D.N. Chemical composition and mechanical properties of various parts of birch wood. Journal of Chemistry and Petroleum Engineering. 2022;56(4):589-602. DOI: 10.14258/jcprm.20220411045
4. Thurner T., Kuzminov I., Lobanova P. The Russian forest industry: declining wood production and emerging opportunities in bioenergy. Biofuels. 2022;13(7):845-857. DOI: 10.1080/17597269.2022.2144761
5. Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Birchwood pre-hydrolytic treatment effect on physical and mechanical characteristics of composite material obtained on its basis. Forestry Bulletin. 2022;26(4):103-112. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-103-112
6. Rudykh L.G., Khomich N.V. Problems and prospects of low-rise construction in Eastern Siberia in 2020-2021. AIP Conference Proceedings. 2022; 2456:020013. DOI: 10.1063/5.0091611
7. Arefieva S.A., Vavilova V.V. Unique application of composite materials in modern science and technology. Modern Science. 2022; 4:41-47. DOI: 10.47813/mip.4.2022.4.41-47
8. Zhukov A., Stepina I., Bazhenova S., Sodomon M. Preliminary optimization of composite compositions based on modified Sosnowsky's Heracleum. BioResources. 2024;19(3):5731-5740. DOI: 10.15376/biores.19.3.5731-5740
9. Gorbunova V., Menshikov S. The Chemical Composition of Birch Leaves and the Vital State of Birch Stands in the Gradient of Aerotechnogenic Emissions of JSC "Karabashmed". Environmental Research. 2023; 216:114432. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114432
10. Platonov A., Novikov A., Kantyeva E.V., Snegireva S., Novikova T., Drapalyuk M. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. Forests. 2022;13(11):1758. DOI: 10.3390/f13111758
11. Safina A., Safin R.G., Valeev K.V., Nazipova L.R., Solov'eva E.N. Mathematical description of birch bark impregnation and heating process of birch bark with toluene. E3S Web of Conferences. 2023; 413:06007. DOI: 10.1051/e3sconf/202341306007
12. Medvedev S.P., Yakusheva M., Dudin P. A model for improving the efficiency of forest industry enterprises in the context of rational environmental management. BIO Web of Conferences. 2024; 108:14004. DOI: 10.1051/bioconf/202410814004
13. Krivorotova A.I., Usoltsev O.A. Study of the possibility of using biomass coniferous in the production of composite materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2023; 1230:012011. DOI: 10.1088/1757-899X/1230/1/012011
14. Dolmatov S., Scherbakov A., Tsubiks V., Zhadan O., Sayfutdinova A., Sakhapov R. Increasing the efficiency of design in CAD CAE systems based on the application of parametrization methods. BIO Web of Conferences. 2024; 105:05010. DOI: 10.1051/bioconf/202410505010

15. Kunickaya O., Levushkin D., Voronova A., Storodubtseva T., Kruchinin I., Pomiguev A., Borisov V.M., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals. Forests. 2023;14(8):1543. DOI: 10.3390/f14081543
16. Zyryanov M., Yakusheva M.O. The introduction of modern woodworking equipment into the logging process as a tool to improve environmental management. BIO Web of Conferences. 2024;1 08:14005. DOI: 10.1051/bioconf/202410814005
17. Saveliev Y. Biotechnological potential of the forest regions of Russia and a feasibility study for integrated processing of forest biotechnological resources. Forestry Bulletin. 2022;26(2):45-53. DOI: 10.15862/02nzor122
18. Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review. *Sensors*. 2024; *24*(10), 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117
19. Reinprecht L., Iždinský J. Composites from Recycled and Modified Woods – Technology, Properties, Application. MDPI Books. 2023;210 p. DOI: 10.3390/books978-3-0365-3108-3
20. Wenig C, Reppe F, Horbelt N, Spener J, Berendt F, Cremer T, et al. Adhesives free bark panels: An alternative application for a waste material. PLoS ONE. 2023; 18(1): e0280721. https://doi.org/10.1371/journal.pone.02807212023

Сведения об авторах

✉ *Черных Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1047-7331, e-mail: as-umu@mail.ru

Рублев Илья Юрьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7129-699X, e-mail: ilya.rublev.2001@mail.ru

Information about the authors

✉ *Alexander S. Chernykh* – Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Forestry, Metrology, Standardization, and Certification, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1047-7331, e-mail: as-umu@mail.ru

Ilya Yu. Rublev – Postgraduate Student, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Department of Forestry Industry, Metrology, Standardization and Certification, 8 Timiryazeva Street, Voronezh, 394087; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7129-699X, e-mail: ilya.rublev.2001@mail.ru

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/27
УДК 630*181:551.583(470+571)

Динамика количественного распределения видов адаптационных мероприятий и затрат на их проведение в лесах России в условиях изменений климата

Артем В. Константинов[1]✉, science@spb-niilh.ru, https://orcid.org/0000-0002-1864-9313
Даниил С. Бурцев[1,2], dsburtcev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-4825-1162
Елена С. Гаврилюк[1,2], gavrilyukes@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-3869-1578
Татьяна С. Королева[1], koroleva@spb-niilh.ru, https://orcid.org/0000-0002-4428-0193
Зарина А. Торшукова[1], z.torshukova@spb-niilh.ru, https://orcid.org/0009-0001-3331-8432

[1] *ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация*
[2] *Университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, г. Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация*

Исследование посвящено анализу эволюции стратегий адаптации лесного хозяйства Российской Федерации к изменению климата в период 2019–2024 гг. Акцент сделан на управлении ключевыми климатическими рисками: снижением продуктивности лесов, трансформацией видового и породного состава, ростом частоты и интенсивности лесных пожаров, вспышками массового размножения вредных организмов и последствиями экстремальных погодных явлений. Основная цель работы – на основе количественного анализа динамики адаптационных мероприятий и структуры бюджетных затрат выявить сдвиги в приоритетах региональных и федеральных стратегий адаптации и сформулировать рекомендации по их совершенствованию. Методологическую основу исследования составили диалектический метод научного познания, системно-структурный подход, методы сравнительного и статистического анализа, а также элементы экономического анализа. Эмпирической базой послужили официальные статистические данные, ведомственные отчёты, научные публикации и нормативно-правовые акты, регулирующие развитие лесного сектора в условиях климатических изменений. Результаты показали устойчивый рост общего числа адаптационных мер (+47% за пять лет), доминирующую роль противопожарной направленности и значительный рост внимания к изменению породного состава лесов (+134%), при этом меры по адаптации к экстремальным погодным явлениям и биотическим угрозам остаются недостаточно развитыми. Выявленная волатильность бюджетных расходов подчеркивает необходимость перехода к прогнозируемому, системному финансированию адаптационных стратегий.

Ключевые слова: *изменение климата, лесное хозяйство, адаптация, климатические риски, лесные пожары, вредные организмы, экстремальные погодные явления, бюджетные затраты, адаптивное лесоуправление, породный состав*

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства лесного хозяйства от 26.12.2024 г. № 053-00005-25-00 по теме «Разработка системы планирования, реализации и оценки эффективности мер государственной климатической политики в лесном секторе Российской Федерации» (шифр: 2-Д24 климатическая политика).

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Динамика количественного распределения видов адаптационных мероприятий и затрат на их проведение в лесах России в условиях изменений климата / А.В. Константинов, Д.С. Бурцев, Е.С. Гаврилюк, Т.С. Королева, З.А. Торшукова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 456-472. – *Библиогр.: с. 469–472 (22 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/27.

Поступила 13.07.2025. ***Пересмотрена*** 10.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Dynamics of quantitative distribution of types of adaptation measures and costs for their implementation in Russian forests under climate change conditions

Artem V. Konstantinov[1]✉, science@spb-niilh.ru, https://orcid.org/0000-0002-1864-9313
Daniil S. Burtcev[2], dsburtcev@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-4825-1162
Elena S. Gavrilyuk[2], gavrilyukes@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-3869-1578
Tatiana S. Koroleva[1], koroleva@spb-niilh.ru, https://orcid.org/0000-0002-4428-0193
Zarina A. Torshukova[1], z.torshukova@spb-niilh.ru, https://orcid.org/0009-0001-3331-8432

[1] *Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation*
[2] *ITMO University, Kronverksky Pr. 49, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation*

Abstract

This study analyzes the evolution of adaptation strategies in the forestry sector of the Russian Federation to climate change during the period 2019–2024. The focus is placed on managing key climate-related risks: declining forest productivity, shifts in species and stand composition, increasing frequency and intensity of wildfires, outbreaks of harmful organisms, and the impacts of extreme weather events. The main objective is to identify shifts in the priorities of regional and federal adaptation strategies by quantitatively analyzing the dynamics of adaptation measures and the structure of budget expenditures, and to develop recommendations for their improvement. The methodological framework is based on the dialectical method of scientific inquiry, a systems-structural approach, comparative and statistical analysis, as well as elements of economic analysis. The empirical base includes official statistics, agency reports, scientific publications, and regulatory documents governing the development of the forestry sector under climate change. The results demonstrate a steady increase in the overall number of adaptation measures (+47% over five years), the dominant role of prevention of wildfire, and significant growth of attention to changes in forest species composition (+134%), while measures aimed at addressing extreme weather events and biotic threats remain underdeveloped. The identified volatility of budget expenditures highlights the need for a transition to predictable and systemic financing of adaptation strategies.

Keywords: *climate change, forestry, adaptation, climate risks, wildfires, harmful organisms, extreme weather events, budget expenditures, adaptive forest management, species composition*

Funding: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Forestry Agency dated December 26, 2024 No. 053-00005-25-00 on the topic «Development of a system for planning, implementing and evaluating the effectiveness of state climate policy measures in the forestry sector of the Russian Federation» (code: 2-D24 climate policy).

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of the article.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Konstantinov A.V., Burtcev D.S., Gavrilyuk E.S., Koroleva T.S., Torshukova Z.A. (2025). Dynamics of quantitative distribution of types of adaptation measures and costs for their implementation in Russian forests under climate change conditions. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 456-472 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/27.

Received 13.07.2025. ***Revised*** 10.102025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Современные исследования свидетельствуют об устойчивом росте частоты и масштабов опасных природных процессов в Российской Федерации, вызванных как изменениями климата, так и усилением антропогенной нагрузки, что порождает значительные материальные убытки, ущерб экосистемам и социальной инфраструктуре. Установлена прямая связь между частотой природных чрезвычайных ситуаций и необходимостью усиления превентивных мер, включая мониторинг, разработку нормативов и строительство инфраструктуры устойчивости [1].

Исследования показывают, что на в горных экосистемах наблюдается экспансия древесных и кустарниковых видов вверх по высотной границе, что свидетельствует о заметных структурных изменениях лесной растительности под воздействием повышения температуры и изменения режима осадков [2]. Это явление подтверждает необходимость включать в адаптационные мероприятия меры, направленные на трансформацию видов и породного состава лесов как ответ на климатические тренды.

Современные природные процессы, такие как экстремальные погодные явления, пожары, деградация экосистем и изменение климата, становятся всё более интенсивными и наносят серьезный ущерб населению, экономике и природным системам, причем эти проявления негативного влияния глобального изменения климата наблюдаются практически во всех регионах планеты и требуют значительных ресурсов на восстанавливающие и превентивные меры [3].

Также исследования показывают, что изменение климата приводит к существенным трансформациям в гидрологическом режиме территорий, с увеличением вариабельности водообеспечения и ростом риска водного дефицита, что усугубляет экологические, социальные и экономические последствия на региональном уровне [4].

Эти факты подчеркивают важность адаптивных мероприятий в лесном хозяйстве, особенно тех, которые направлены на корректировку продуктивности и состава лесов, а также стратегического планирования превентивных мер в ответ на изменяющиеся водный режим и распределение осадков.

Другие исследования демонстрируют, что в высокогорных экосистемах Катунского хребта наблюдаются значительные изменения в возрастной структуре древостоев и подроста, что свидетельствует о реакциях лесных экосистем на климатические изменения, особенно на повышение температуры и сдвиг границ леса вверх по склонам [5].

В условиях изменения климата важность сохранения и восстановления природных лесов Восточной Европы возрастает. Восточноевропейские леса служат важными экосистемами, поддерживающими биологическое разнообразие, регулирующими климатические процессы и обеспечивающими устойчивость экосистем к изменениям окружающей среды. Сохранение их природного состояния и восстановление утраченных лесных экосистем становятся приоритетными задачами для обеспечения устойчивого развития региона. Методы восстановления, такие как естественное возобновление и активное вмешательство, должны быть адаптированы к специфическим условиям каждого региона [6].

Комплексный подход к региональной адаптации, включающий три взаимосвязанных компонента: мониторинг климатических изменений (температурные колебания, осадки, талая вода), оценку уязвимости экосистем и антропогенных объектов, а также разработку и внедрение адаптивных мер, направленных на повышение

устойчивости природных и социальных систем региона, является соразмерным ответом на выявленные угрозы [7]. Такой междисциплинарный подход позволяет повысить точность прогнозов, снизить риск ущерба для экосистем и людей, а также обеспечить координацию усилий различных заинтересованных сторон, включая федеральные и региональные органы власти, научные учреждения и местные сообщества.

Введение адаптационных мероприятий в лесное хозяйство России в условиях изменения климата требует комплексного подхода, который учитывает не только экологические, но и социально-экономические аспекты. Например, такой подход может быть реализован на основе экономико-математической модели регионального лесного комплекса, интегрирующей блоки лесозаготовки, деревообрабатывающей промышленности и экосистемных услуг лесных территорий [8]. Апробация указанной модели на примере лесных массивов Сибири и Дальнего Востока, характеризующихся значительными запасами древесных ресурсов и развитыми производственными мощностями по их переработке, демонстрирует недопустимость сохранения существующих тенденций лесоуправления. Проведенные сценарные расчеты свидетельствуют, что текущая модель эксплуатации лесных ресурсов неприемлема как с позиций обеспечения устойчивого развития отрасли, так и в контексте реагирования на глобальные климатические вызовы. Цель по увеличению поглощения углерода до 1,2 млрд. т CO_2-эквивалента к 2050 году, заявленная в Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов, требует активного развития лесоклиматического сектора.

В условиях изменения климата лесное хозяйство России сталкивается с необходимостью адаптации, включая трансформацию лесных экосистем для повышения их углеродной эффективности. Рассмотрим концепцию функционально-целевой «карбоновой» системы объектов лесоводства, ориентированной на углерододепонирующее и углеродоконсервационное назначение [9]. Эта система включает в себя объекты лесоводства, которые с разным уровнем приоритета выполняют функции депонирования и сохранения углерода, а также климаторегулирующие задачи. Формирование такой системы требует комплексного подхода, включающего разработку рубок 40–50-летней давности в двухъярусных лиственно-еловых древостоях с сохранением елового яруса, что способствует улучшению структуры лесных экосистем и повышению их устойчивости к климатическим изменениям.

Адаптация лесных экосистем России к изменениям климата требует комплексного подхода, включающего оценку климатических рисков, разработку адаптационных стратегий и внедрение эффективных управленческих механизмов. Анализ мирового опыта в области планирования адаптации к климатическим изменениям, в котором выявлены ключевые принципы и методы, применяемые в различных странах, а также рассмотрены возможности их адаптации к российским условиям подчеркивает важность интеграции климатических факторов в стратегическое планирование и необходимость разработки национальных планов адаптации, ориентированных на устойчивое социально-экономическое развитие [10].

Адаптация лесного сектора России к изменениям климата требует комплексного подхода, включающего оценку климатических рисков, разработку адаптационных стратегий и внедрение эффективных механизмов управления. В частности, использование моделей комплексной оценки (IAM) позволяет количественно оценить потенциальные экономические последствия климатических изменений, что способствует более обоснованному планированию адаптационных мероприятий. Применение таких моделей в российских условиях показало, что экономический эффект изменения климата может варьироваться от –1,3 трлн до +200 млрд рублей к 2040 году, что подчеркивает необходимость разработки адаптивного лесоуправления, способного

минимизировать риски и оптимизировать использование ресурсов [11].

Адаптация лесов России к изменениям климата требует комплексного подхода, включающего как защиту экосистем, так и рациональное использование лесных ресурсов. Можно выделить ряд мероприятий для сохранения биологического разнообразия и повышения устойчивости лесов бореальной зоны: сохранение естественных лесных экосистем, восстановление деградированных территорий с помощью смешанных и разновозрастных насаждений, контроль антропогенной нагрузки, поддержание гидрологического баланса и мониторинг состояния лесов [12]. Эти меры способствуют снижению климатических рисков, поддержанию ресурсного потенциала лесов и обеспечению их долгосрочной экологической и экономической стабильности.

Современное лесотипологическое районирование южной равнинной части Европейской России позволяет выявить значительное разнообразие лесных климатопов, включая термотопы, контрастотопы и гигротопы, которые отличаются широтной и меридиональной зональностью и сложным пространственным распределением. Проведенный анализ демонстрирует, что эффективное адаптивное управление лесами требует комплексного учета региональной специфики, включая дифференциацию климатических режимов, влияние орографических факторов (Кавказские горы) и акваторий (Черное море), а также особенностей локальных экотонных зон. Учет пространственной неоднородности указанных факторов имеет ключевое значение для разработки целевых мероприятий, направленных на снижение уязвимости лесных экосистем к климатическим изменениям. Предлагаемые принципы районирования создают научную основу для формирования адаптивных лесохозяйственных стратегий, ориентированных на повышение устойчивости лесов в условиях трансформирующегося климата [13].

Анализ воздействия современных изменений климата на лесные экосистемы России показывает, что леса выполняют критически важные функции как объекты и средства адаптации к неблагоприятным гидрометеорологическим явлениям. Выделяют следующие ключевые направления адаптационных мероприятий: предотвращение ущерба лесам, снижение последствий экстремальных явлений, использование естественных адаптационных возможностей экосистем, а также создание специальных категорий защитных «адаптационных лесов» для поддержания гидрологического режима, защиты от эрозии, ветров и пыльных бурь [14].

Современный климатический дискурс в России отражает высокую сложность формирования государственной климатической политики в условиях глобальных рисков изменения климата. Можно выделить четыре подхода: от климатического скептицизма, препятствующего активной политике, до адаптационного подхода, ориентированного на приспособление населения и экономики к изменениям климата, включая селективные меры с учетом экологических рисков регионов [15].

Изменения климата усиливают риск лесных пожаров, вызывая трансформацию экосистем и изменение распределения видов, что делает лесные массивы более уязвимыми к огню и повышает опасность для населения и инфраструктуры. В таких условиях актуальность правовых мер профилактики лесных пожаров возрастает: необходимо не только наличие законодательства, регулирующего противопожарные меры, но и его системная реализация на территориях с повышенной и потенциальной пожарной опасностью. Опыт Франции показывает, что эффективность адаптации лесов к новым климатическим условиям зависит от комплексного применения мер, включая управление лесными ресурсами, оборудование для тушения пожаров, градостроительное планирование и информирование населения [16].

Изменение климата оказывает существенное влияние на частоту и интенсивность лесных пожаров в России, особенно в регионах с экстремально засушливым климатом, таких как Республика Саха (Якутия). Повышение среднегодовой температуры, более раннее таяние снега и увеличение продолжительности

пожароопасного сезона создают благоприятные условия для быстрого распространения огня, что наносит значительный экономический и экологический ущерб лесным экосистемам. Для снижения рисков необходимо развивать системы метеомониторинга, адаптированное лесоуправление, образовательные программы и раннее предупреждение населения о пожарах [17].

Современные исследования показывают, что изменения климата существенно осложняют задачи сохранения видов и экосистем на особо охраняемых природных территориях России, требуя разработки дополнительных адаптационных мер. Оценка уязвимости территорий позволяет выявить, какие экосистемы и виды наиболее подвержены неблагоприятным климатическим воздействиям, включая экстремальные погодные явления и сдвиги ареалов обитания. Применение комплексных методик, интегрирующих данные наблюдений, климатическое моделирование и картографирование, способствует планированию эффективных адаптационных действий, обеспечивающих устойчивость природных комплексов в долгосрочной перспективе [18].

Актуальность темы адаптации лесов России к изменению климата подтверждается исследованиями, показывающими, что даже в пределах Московской области комплексная оценка состояния лесов выявляет значительные дисбалансы между нагрузкой на экосистему и принимаемыми мерами по её охране и восстановлению. В частности, наименее нарушенные лесные территории имеют минимальное давление и получают достаточную защиту через сеть особо охраняемых природных территорий и активное лесовосстановление, тогда как фрагментированные и истощённые леса сталкиваются с нехваткой подобных мер при одновременном росте антропогенной нагрузки [19].

Изменение климата рассматривается как один из ключевых глобальных вызовов, требующих скоординированных международных усилий и выработки правовых механизмов для его смягчения и адаптации. В рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (1992 г.) и Парижского соглашения по климату (2015 г.) закреплены принципы общей, но дифференцированной ответственности государств, а также меры по укреплению адаптационных возможностей и повышению устойчивости к неблагоприятным климатическим воздействиям. При этом особое внимание уделяется согласованию национальных и международных действий, включая финансовую и технологическую поддержку развивающихся стран, что создает правовую основу для долгосрочного устойчивого развития и сохранения экосистем, в том числе лесных. В контексте адаптивного лесоуправления данные международные нормы подчеркивают необходимость разработки стратегий, позволяющих снижать уязвимость лесов к климатическим рискам и обеспечивать их экологическую устойчивость [20].

Современные исследования демонстрируют, что лесные экосистемы России испытывают значительное давление климатических изменений, проявляющееся в снижении адаптационного потенциала и росте деструктивных процессов, включая лесные пожары и деградацию древостоев. Анализ 24 модельных субъектов Российской Федерации показал необходимость дифференцированного подхода к управлению лесами с учетом региональных особенностей, степени уязвимости и устойчивости экосистем, а также прогнозируемых климатических рисков. Применение сценарного подхода позволяет формировать управленческие решения и адаптационные мероприятия, направленные на поддержание и усиление адаптационного потенциала лесных экосистем, что является ключевым для устойчивого лесоуправления в условиях изменения климата [21].

Анализ последних исследований показывает, что изменения климата и рост концентрации CO_2 в атмосфере способны существенно увеличить продуктивность лесов России и, как следствие, их энергетический потенциал. Согласно расчетам, ожидаемое повышение чистой первичной продукции лесов к середине XXI века может составить в среднем 40% по территории страны, при этом на Дальнем Востоке и в Сибири прирост

достигает 45% [22]. Это подчеркивает важность разработки адаптивных мероприятий в лесном хозяйстве, направленных на эффективное использование растущих ресурсов и минимизацию возможных рисков, связанных с вредителями, болезнями и региональными климатическими особенностями.

Приведенный обзор научной литературы демонстрирует, что проблема адаптации лесного хозяйства России к изменению климата приобретает всё большую научную и практическую значимость. Современные исследования убедительно подтверждают: климатические изменения уже оказывают ощутимое воздействие на лесные экосистемы страны – от Арктики до южных равнин. Наблюдаются структурные трансформации растительности (экспансия древесных пород в высокогорья, сдвиг границ леса), изменение гидрологического режима, рост частоты и интенсивности лесных пожаров, вспышек вредителей и последствий экстремальных погодных явлений. Эти процессы не только снижают устойчивость лесов, но и угрожают социально-экономической стабильности регионов, требуя перехода от реактивного реагирования к системной, научно обоснованной политике адаптации.

Анализ работ отечественных и зарубежных авторов выявляет ключевые направления адаптивного лесоуправления: корректировку породного и возрастного состава насаждений, сохранение природных лесов, создание разновозрастных и смешанных лесов, развитие «карбоновой» функции лесов, внедрение защитных категорий лесов, а также интеграцию климатических рисков в стратегическое и территориальное планирование. Особое внимание уделяется необходимости комплексного подхода, сочетающего экологические, экономические и институциональные аспекты. При этом подчёркивается важность региональной дифференциации мер, поскольку климатические риски и адаптационный потенциал лесов существенно варьируются от субъекта к субъекту – от засушливых территорий Якутии до влажных предгорий Кавказа.

Однако, несмотря на растущий объём теоретических и прикладных исследований, остаётся недостаточно эмпирических данных о том, как именно формируются и реализуются адаптационные стратегии на практике. В частности, отсутствует системный анализ динамики и структуры конкретных мероприятий, а также распределения бюджетных ресурсов по различным типам климатических рисков. Именно этот пробел и призвана заполнить настоящая работа. Цель исследования – на основе количественного анализа официальных данных за 2019–2024 гг. выявить, какие климатические угрозы становятся приоритетными для органов лесного управления, как меняется соотношение между различными видами адаптационных мер и насколько эффективно распределяются финансовые ресурсы. Такой подход позволяет не только оценить текущее состояние адаптивного лесоуправления, но и сформулировать обоснованные рекомендации по его совершенствованию в соответствии с вызовами климатического будущего.

Объекты и методы исследований

Объектом настоящего исследования являются адаптационные мероприятия, реализуемые в лесном хозяйстве Российской Федерации в условиях изменения климата. Предмет исследования – динамика распределения этих мероприятий по видам климатических рисков, а также структура и масштабы бюджетных затрат на их реализацию в 2019–2024 гг. Методологическую основу исследования составили диалектический метод научного познания, системно-структурный подход, методы сравнительного анализа, а также элементы экономического анализа для оценки распределения затрат. В качестве вспомогательных применялись методы аналогии и контент-анализа для интерпретации научных публикаций, нормативных документов и стратегических материалов по управлению лесами в условиях изменения климата. Эмпирическую базу исследования составили официальные статистические материалы и ведомственные отчёты о реализации мероприятий по адаптации лесного хозяйства к изменению климата, данные о бюджетных затратах в 2019–2024 гг., а также

материалы научных публикаций, стратегических и нормативно-правовых документов, регламентирующих развитие лесного сектора. В числе информационных источников использованы отчёты и аналитические материалы, представленные федеральными органами власти в открытых источниках сети Интернет.

Результаты и обсуждение

В данном разделе представлен эмпирический анализ динамики реализации адаптационных мероприятий в лесном хозяйстве Российской Федерации в условиях усиления климатических угроз. На основе систематизации количественных данных за период 2019-2024 гг. исследуется эволюция приоритетов государственной и региональной политики в сфере адаптивного лесоуправления. Центральное внимание уделяется распределению мер адаптации по пяти ключевым климатическим рискам: изменению продуктивности лесов, трансформации породного состава, увеличению лесных пожаров, вспышкам численности вредных организмов и последствиям экстремальных погодных явлений. Проведенный анализ позволяет идентифицировать приоритетные направления финансирования и оценить степень сбалансированности практической реализации адаптационной стратегии лесного сектора. В разделе последовательно рассматриваются два аспекта: динамика количества видов адаптационных мероприятий по каждому из выделенных рисков (табл. 1 и 2) и структура и масштабы бюджетных затрат, направленных на их реализацию (табл. 3). Используемые данные основаны на официальной статистике, ведомственных отчётах и стратегических документах, что обеспечивает достоверность и репрезентативность выводов. Представленные результаты не только иллюстрируют текущие тенденции в адаптивном лесоуправлении, но и служат основой для обсуждения соответствия национальной практики международному опыту, выявления пробелов в политике и формулирования рекомендаций по повышению эффективности адаптационных стратегий в условиях ускоряющихся климатических изменений.

Таблица 1

Динамика количественного распределения видов адаптационных мероприятий, направленных на снижение климатических рисков в период 2019–2024 гг. в разрезе климатических рисков (единицы)

Table 1

Dynamics of the quantitative distribution of types of adaptation measures aimed at reducing climate risks in the period 2019–2024 in the context of climate risks (units)

Климатический риск | Climate risk	Количество видов мероприятий по годам | Number of types of measures by year					
	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков | Changes in forest productivity due to changes in average temperature and precipitation	84	81	67	96	175	127
Изменения в видовом (породном) составе лесов | Changes in the species composition of forests	74	75	77	86	145	173
Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами | Increase in the frequency of forest fires and areas affected by fires	294	290	295	337	423	389
Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах | Increased frequency of outbreaks of pests in forests	96	96	78	106	122	116

Климатический риск | Climate risk	Количество видов мероприятий по годам | Number of types of measures by year					
	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах | Increased frequency of extreme weather events in forests	50	49	50	61	71	74
Итого | Total	598	591	567	686	936	879

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Анализ динамики количественного распределения видов адаптационных мероприятий в период 2019–2024 гг. показывает значительные различия в уровне внимания к различным климатическим рискам в лесном хозяйстве России. Наибольшее количество мероприятий систематически направлено на снижение риска «Увеличение частоты возникновения лесных пожаров и площадей, пройденных пожарами», где число видов мероприятий колеблется от 294 в 2019 году до 389 в 2024 году. Высокий уровень внимания к этому риску обусловлен прямой угрозой для лесных экосистем и социальной инфраструктуры, а также наличием развитых методических и технических подходов к предотвращению и тушению лесных пожаров, что соответствует международной практике в США, Канаде и Австралии, где превалирует концентрация ресурсов на профилактике и оперативном реагировании на пожары.

Второй по числу мероприятий риск – «Изменения в видовом (породном) составе лесов», где количество мероприятий увеличилось с 74 в 2019 году до 173 в 2024 году. Рост числа мероприятий отражает смещение акцентов на структурные изменения лесных насаждений, формирование разновозрастных, смешанных и многоярусных насаждений, что повышает их устойчивость к климатическим стрессам и биотическим угрозам.

Международный опыт подтверждает стратегическую значимость подобных мер для адаптации лесов к изменяющемуся климату, включая работу европейских стран по восстановлению биоразнообразия и внедрению смешанных лесных насаждений.

Для риска «Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков» наблюдается более резкая динамика: снижение числа мероприятий до 67 в 2021 году и резкий рост до 175 в 2023 году. Такая волатильность может быть связана с реакцией на экстремальные погодные события и необходимостью корректировки планов лесоразведения и ухода за насаждениями в ответ на изменяющиеся климатические условия.

Риск «Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах» сохраняет относительно стабильное количество мероприятий (96 в 2019 г. и 116 в 2024 г.), что указывает на поддержание систематического мониторинга и санитарно-оздоровительных мер, однако его доля существенно меньше, чем у пожаров и структурных изменений лесов. Наиболее низкий уровень обеспеченности адаптационными мероприятиями наблюдается для риска «Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах», где количество мероприятий увеличилось лишь с 50 до 74. Это указывает на недостаточное развитие мер по ликвидации ветровалов, буреломов и снеголомов, внедрению дистанционного мониторинга и технологий повышения устойчивости лесов, что соответствует международной практике, где адаптация к экстремальным погодным событиям остается сложной задачей из-за их непредсказуемости и локального характера.

Различия в количестве мероприятий между климатическими рисками могут объясняться сочетанием факторов: непосредственной угрозой для лесов и населения, развитостью методических подходов и доступностью технологий, а также исторически сложившимися приоритетами лесного хозяйства. Природа этих различий отражает как практическую готовность к реагированию на риски, так и стратегические ориентиры государственной политики в области климатической адаптации лесного сектора.

В целом, сопоставление с международным опытом показывает, что российская практика соответствует глобальной тенденции концентрации усилий на наиболее очевидных и управляемых рисках, таких как лесные пожары и структурные изменения лесов, в то время как меры по адаптации к экстремальным погодным явлениям и биотическим угрозам требуют дальнейшего развития и стандартизации.

Таблица 2

Изменение количественного распределения видов адаптационных мероприятий, направленных на снижение климатических рисков в период 2019–2024 гг. в разрезе климатических рисков (%)

Table 2

Changes in the quantitative distribution of types of adaptation measures aimed at reducing climate risks in the period 2019–2024 in the context of climate risks (%)

Климатический риск	Изменение в % к предыдущему году | Change in % compared to the previous year					Изменение 2024 года в % к 2019 году | Change in 2024 as a % compared to 2019
	2020	2021	2022	2023	2024	
Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков | Changes in forest productivity due to changes in average temperature and precipitation	-4	-17	+43	+82	-27	+51
Изменения в видовом (породном) составе лесов | Changes in the species composition of forests	+1	+3	+12	+69	+19	+134
Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами | Increase in the frequency of forest fires and areas affected by fires	-1	+2	+14	+26	-8	+32
Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах | Increased frequency of outbreaks of pests in forests	0	-19	+36	+15	-5	+21
Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах | Increased frequency of extreme weather events in forests	-2	+2	+22	+16	+4	+48
Итого | Total	-1	-4	+21	+36	-6	+47

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает, что в период 2019–2024 гг. динамика количественного распределения адаптационных мероприятий характеризовалась высокой

изменчивостью по отдельным климатическим рискам, однако общая тенденция демонстрирует рост: +47% в 2024 г. по сравнению с 2019 г.

1. «Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков». Этот риск демонстрирует наиболее волатильный тренд. После небольшого снижения в 2020–2021 гг. обсужде(–4% и –17%) наблюдается резкий рост в 2022–2023 гг. (+43% и +82%), а в 2024 г. опять фиксируется снижение (-27%). Однако, за пять совокупное увеличение лет составило +51%. Такая динамика отражает постепенный переход регионов от осторожного старта к активному наращиванию мер по повышению устойчивости лесов к изменениям температуры и влагообеспеченности.

«Изменения в видовом (породном) составе лесов». Этот риск демонстрирует самый выраженный тренд роста: +134% к 2019 г. Кумулятивная динамика носит экспоненциальный характер – особенно заметный скачок приходится на 2023 г. (+69%). Такой рост объясняется усилением интереса к диверсификации лесных культур, внедрению адаптированных к климатическим изменениям пород и контролю за инвазивными видами.

2. «Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами». Здесь фиксируется умеренный рост: +32% за период. Колебания умеренные, с небольшими отрицательными значениями в 2020 и 2024 гг. (–1% и –8%). Это указывает на устойчивое развитие институциональных мер пожарной безопасности: наращивание происходит постепенно, без резких скачков.

3. «Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах». Динамика менее устойчивая, с падением в 2021 г. (–19%) и последующими колебаниями. Совокупный рост составил +21% – это наименьший результат среди всех рисков. Вероятно, причина заключается в ограниченных ресурсах и в том, что борьба с вредителями рассматривается как специализированная задача, а не как приоритетное направление федерального уровня.

4. «Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах». Здесь рост умеренный и поступательный, без резких спадов: +48% за пять лет. Наблюдается постепенная интеграция мер в систему управления лесами, что отражает растущее внимание к ураганам, буреломам и другим экстремальным явлениям в условиях климатических изменений.

В совокупности, по всем климатическим рискам отмечается общий рост (+47%), при этом наибольший вклад обеспечили блоки «изменения в видовом составе лесов» и «изменение продуктивности лесов».

Таблица 3

Динамика общих затрат на адаптационные мероприятия, направленных на снижение климатических рисков в период 2019–2024 гг. (млн руб.)

Table 3

Dynamics of total expenditures on adaptation measures aimed at reducing climate risks in the period 2019–2024 (million rubles)

Климатический риск	Затраты на адаптационные мероприятия, млн руб. | Costs of adaptation measures, million rubles					
Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков | Changes in forest productivity						
Изменения в видовом (породном) составе лесов | Changes in the species composition of forests						

Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами | Increase in the						
Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах | Increased frequency of outbreaks						
Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных я						
Итого | Total						

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Анализ данных из таблицы 3 демонстрирует существенные различия в распределении затрат на адаптационные мероприятия в зависимости от климатического риска, а также выраженную динамику расходов в период 2019–2024 гг. Общие затраты по всем видам рисков варьируются от 10 980,2 млн руб. в 2019 году до пика в 53 745,1 млн руб. в 2023 году, что свидетельствует о значительном наращивании усилий по адаптации лесного хозяйства к климатическим изменениям и о высокой чувствительности бюджетирования к экстремальным событиям.

Наибольший объем финансирования традиционно направляется на мероприятия по снижению риска, связанного с увеличением частоты возникновения лесных пожаров и расширением пройденных огнем площадей. Пиковые значения расходов зафиксированы в 2022 году (21 604,9 млн рублей) и 2023 году (19 335,6 млн рублей), что демонстрирует сохраняющийся приоритет противопожарных мер в системе адаптационного управления лесами. Это объясняется высокой социально-экономической и экологической значимостью предотвращения лесных пожаров, а также необходимостью инвестиций в профилактические меры, модернизацию систем мониторинга, средств тушения и инфраструктуры для обеспечения безопасности лесов. Международный опыт, например, в США и Канаде, подтверждает, что затраты на профилактику и ликвидацию лесных пожаров составляют значительную долю бюджета лесного хозяйства и напрямую коррелируют с частотой и масштабом пожаров.

Затраты на адаптационные мероприятия по риску «Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах» демонстрируют выраженную волатильность: минимальные значения наблюдаются в 2021 году (709,1 млн руб.), пиковые – в 2023 году (21 320,9 млн руб.). Основной вклад в эту динамику вносит формирование разновозрастных и многоярусных насаждений, а также корректировка циклов лесоразведения. Такая структура расходов соответствует международной практике, где устойчивое лесопользование и профилактическое укрепление лесных экосистем рассматриваются как ключевые меры по снижению уязвимости к экстремальным погодным событиям.

Сравнительно умеренные, но устойчивые расходы наблюдаются по риску «Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков», а также по риску «Изменения в видовом (породном) составе лесов». Их динамика характеризуется периодическими пиками в 2023–2024 гг., что может быть связано с реализацией крупных лесовосстановительных проектов, внедрением новых породных сочетаний и корректировкой лесоуправленческих стратегий в ответ на выявленные климатические тренды.

Затраты на мероприятия по снижению риска «Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах»

остаются наименее капиталоемкими и менее волатильными, что связано с меньшей масштабностью таких мероприятий и более локальным характером воздействия. Тем не менее рост расходов в 2023 году до 1 605,3 млн руб. указывает на эпизодическое усиление мер в периоды повышенной биологической угрозы.

Причины различий в масштабах затрат между рисками могут быть объяснены несколькими факторами: вариативностью угрозы (пожары и экстремальные погодные явления имеют резкое сезонное и региональное проявление), социально-экономической значимостью ущерба, а также различной капиталоемкостью мероприятий (формирование насаждений требует крупных инвестиций, тогда как мониторинг вредных организмов – относительно низкозатратен).

Таким образом, приведенные данные показывают, что распределение затрат на адаптацию лесного хозяйства в России строго коррелирует с природной и экономической значимостью конкретных климатических рисков, демонстрирует высокую волатильность при экстремальных событиях и требует системного, прогнозного подхода к бюджетированию и реализации мер.

Заключение

Проведённый анализ динамики адаптационных мероприятий в лесном хозяйстве Российской Федерации за 2019–2024 гг. свидетельствует о постепенном, но неравномерном формировании системы адаптивного лесоуправления в ответ на усиливающиеся климатические риски. Наибольшее внимание со стороны органов власти и наибольшие бюджетные ассигнования традиционно направлены на снижение угрозы лесных пожаров – наиболее ощутимого и социально значимого последствия изменения климата. В то же время наблюдается уверенный рост числа мероприятий, связанных с трансформацией видового и породного состава лесов, что отражает переход от реактивной к проактивной стратегии, ориентированной на повышение устойчивости экосистем через диверсификацию и структурное изменение лесных насаждений.

Проведенный анализ выявил существенные диспропорции в распределении ресурсов адаптационной политики. Мероприятия, направленные на противодействие последствиям экстремальных погодных явлений и биотическим угрозам (вредителям и болезням леса), реализуются в недостаточном объеме, несмотря на наблюдаемый рост частоты возникновения данных рисков. Сложившаяся ситуация свидетельствует о недостаточной сбалансированности стратегии адаптации, где традиционные направления финансирования доминируют над emerging вызовами, требующими повышенного внимания в условиях меняющегося климата.

Высокая волатильность бюджетных затрат – особенно по таким рискам, как изменение продуктивности лесов и последствия экстремальных погодных явлений – указывает на эпизодический, а не системный характер финансирования, что снижает эффективность долгосрочного планирования. Полученные данные подтверждают необходимость перехода к более сбалансированной, прогнозируемой и научно обоснованной политике адаптации, учитывающей региональную дифференциацию климатических угроз, экосистемные особенности и социально-экономические приоритеты.

Таким образом, адаптация лесного сектора России к изменению климата требует не только количественного наращивания мер, но и качественной трансформации подходов к управлению: от узконаправленной борьбы с последствиями – к комплексной стратегии устойчивого развития, интегрирующей экологические, экономические и институциональные аспекты. Реализация этой задачи возможна лишь при условии укрепления межведомственной координации, стандартизации адаптационных практик, расширения использования научных методов оценки рисков (включая сценарное моделирование) и последовательной интеграции принципов климатической устойчивости в нормативно-правовую и бюджетную основу лесной политики.

Список литературы

1. Кузьмин С.В. Опасные природные процессы в Российской Федерации // Проблемы анализа риска. – 2019. – Т. 16, № 2. – С.10–35. – DOI:10.32686/1812-5220-2019-16-2-10-35.

2. Тимофеев А.С., Вьюхин С.О., Григорьев А.А., Моисеев П.А. Структура и динамика древесной и кустарниковой растительности на верхнем пределе своего произрастания на плато Путорана // Леса России и хозяйство в них. – 2021. – № 1 (76). – С. 23–28. – DOI: 10.51318/FRET.2021.43.24.003.

3. Кузьмин С.Б. Опасные природные процессы – глобальная угроза современности // Век глобализации. – 2021. – № 2 (38). – С.17–29. – DOI:10.30884/vglob/2021.02.02.

4. Журавин С.А., Марков М.Л. Природные риски и стратегия исследований водообеспеченности территорий // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2019. – № 1 (1). – С. 71–89. – DOI:10.34753/HS.2019.1.1.007.

5. Филимонова Е.О., Тимошок Е.Е., Савчук Д.А., Николаева С.А. Современное состояние верхней границы леса в высокогорьях Катунского хребта (Горный Алтай) // Успехи современного естествознания. – 2023. –№ 7. – С. 49–54. – DOI:10.17513/use.38070.

6. Коротков В.Н. Основные концепции и методы восстановления природных лесов Восточной Европы // Российский журнал экосистемной экологии. – 2017. – Т. 2, № 1. – С. 1–18. – DOI: https://doi.org/10.21685/2500-0578-2017-1-1.

7. Анисимов О.А. Оптимизация региональных планов адаптации к изменениям климата в Арктической зоне Российской Федерации // Вестник Арктического научного центра. – 2024. – Т. 3. – С. 350–359. – DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359.

8. Пыжев А.И. Лесная промышленность регионов Сибири и Дальнего Востока: перспективы развития лесоклиматического сектора // Проблемы прогнозирования. – 2022. – № 4 (193). – С. 68–77. – DOI: 10.47711/0868-6351-193-68-77.

9. Желдак В.И. Функционально-целевая «карбоновая» система объектов лесоводства углерододепонирующего и углеродоконсервационного назначения: её формирование и использование // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2022. – № 4 (56). – С. 47–73. – DOI: 10.25686/2306-2827.2022.4.47.

10. Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е., Зинченко Ю.В. Планирование адаптации к изменениям климата: мировой опыт и возможности для устойчивого социально-экономического развития России // Проблемы прогнозирования. – 2023. – № 2 (197). – С. 154–168. – DOI: 10.47711/0868-6351-197-154-168.

11. Порфирьев Б.Н., Колпаков А.Ю., Лазеева Е.А. Оценка влияния изменения климата на экономику России с использованием моделей комплексной оценки (IAM). Проблемы прогнозирования. – 2025. – № 1 (208). – С. 49–61. – DOI: 10.47711/0868-6351-208-49-61.

12. Онучин А.А., Пименова А.В., Соколова В.А. Сохранение биологического разнообразия и рациональное использование лесов бореальной зоны // Вестник Хабаровского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2021. – Т. 1, № 2. – С. 225–241. – DOI: 10.21603/2782-2435-2021-1-2-225-241.

13. Назаренко Н.Н. Современные лесные климатопы и лесотипологическое районирование южной равнинной части Европейской России // Самарский научный вестник. – 2023. – Т. 12, № 1. – С. 68–77. – DOI: 10.55355/snv2023121114.

14. Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. – 2021. – № 5. – С. 532–547. – DOI: 10.31857/S0024114821050077.

15. Лобанов М.М., Звезданович Лобанова Е., Звезданович М. Климатический дискурс в России: от дихотомии климатического сознания к четырем формам климатической политики // Мир России. – 2024. – Т. 33, № 3. – С. 141–169. – DOI: 10.17323/1811-038X-2024-33-3-141-169.

16. Sanseverino-Godfrin V., Garbolino E., Hinojos-Mendoza G. Evolution of the legal prevention measures concerning forest fire risk in a context of climate change // Safety Science. – 2016. – Vol. 87. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.ssci.2016.06.003.

17. Постникова П.О., Парникова С.П., Тананаев Н.И., Парфенова О.Т. Влияние климатических изменений на частоту и интенсивность лесных пожаров: перспективы, последствия и риски // Экономика. Социология. Культурология. – 2024. – № 1. – С. 56–62. – DOI: 10.25587/2587-8778-2024-1-56-62.

18. Lipka O.N. Methodological approaches to climate change vulnerability assessment of protected areas // Nature Conservation Research. – 2017. – Vol. 2, No. 3. P. 68–79. – DOI: 10.24189/ncr.2017.036.

19. Chernenkova T.V., Kotlov I.P., Belyaeva N.G., Morozova O.V., Suslova E.G., Puzachenko M.Yu., Krenke A.N. Sustainable Forest Management Tools For The Moscow Region // Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – Vol. 12, No 4. – P. 35–56. – DOI: https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-57.

20. Соколова Н.А. Изменение климата: развитие международно-правового регулирования // Актуальные проблемы российского права. – 2021. – Т. 16, № 12. – С. 177–184. – DOI: 10.17803/1994-1471.2021.133.12.177-184.

21. Константинов А. В. Сценарный подход к адаптации лесных экосистем Российской Федерации в условиях изменений климата // Известия РАН. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 4. – С. 558–567. – DOI: https://doi.org/10.31857/S2587556623040039.

22. Klimenko V.V., Tereshin A.G., Mikushina O.V. Increase of Energy Potential of Russian Forest Resources due to Climate Change and CO2 Fertilization // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 103. – 02005. – DOI: 10.1051/e3sconf/201910302005.

References

1. Kuz'min S.V. *Opasnye prirodnye processy v Rossijskoj Federacii* [Natural disasters in the Russian Federation] // Problemy analiza riska = Issues of Risk Analysis. 2019;16(2):10-35. (In Russ.). https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-10-35.

2. Timofeev A.S., V'yukhin S.O., Grigor'ev A.A., Moiseev P.A. *Struktura i dinamika drevesnoj i kustarnikovoj rastitel'nosti na verkhnem predele svoego proizrastaniya na plato Putorana* [Structure and dynamics of larch stands in the upper part of the mountain-forest belt of the massif dry mountains (Putorana plateau)]. Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh. 2021;1(76):23-28. (In Russ.). DOI: 10.51318/FRET.2021.43.24.003.

3. Kuz'min S.B. Opasnye prirodnye processy – global'naya ugroza sovremennosti [Hazardous Natural Processes – A Global Threat of Modern Times]. Vek globalizacii. 2021; 2(38):17-29. (In Russ.). DOI:10.30884/vglob/2021.02.02.

4. Zhuravin S.A., Markov M.L. *Prirodnye riski i strategiya issledovanij vodoobespechennosti territorij* [Natural risks and strategy of the water availability research of territories]. Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya. 2019;1(1): 71-89. (In Russ.). DOI:10.34753/HS.2019.1.1.007.

5. Filimonova E.O., Timoshok E.E., Savchuk D.A., Nikolaeva S.A. *Sovremennoe sostoyanie verkhnej granicy lesa v vysokogor'yakh Katunskogo khrebta (Gornyj Altaj).* Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences. 2023; 7:49-54. (In Russ.). DOI:10.17513/use.38070.

6. Korotkov V.N. *Osnovnye koncepcii i metody vosstanovleniya prirodnykh lesov Vostochnoj Evropy* [Basic concepts and methods of restoration of natural forests in Eastern Europe]. Rossijskij zhurnal ehkosistemnoj ehkologii = Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2017;2(1):1-18. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21685/2500-0578-2017-1-1.

7. Anisimov O.A. *Optimizaciya regional'nykh planov adaptacii k izmeneniyam klimata v Arkticheskoj zone Rossijskoj Federacii.* Vestnik Arkticheskogo nauchnogo centra. 2024; 3:350-359. (In Russ.). DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359.

8. Pyzhev A.I. *Lesnaya promyshlennost' regionov Sibiri i Dal'nego Vostoka: perspektivy razvitiya lesoklimaticheskogo sector a* [The Forest Industry of the Regions of Siberia and the Far East: Prospects For the Development of the Forest-Climate Sector]. Problemy prognozirovaniya. 2022;4(193):68-77. (In Russ.). DOI: 10.47711/0868-6351-193-68-77.

9. Zheldak V.I. *Funkcional'no-celevaya «karbonovaYA» sistema ob"ektov lesovodstva uglerododeponiruyushchego i uglerodokonservacionnogo naznacheniya: eyo formirovanie i ispol'zovanie* [Functional-Target "Carbon" System of Forestry Objects for Carbon Sequestration and Carbon Conservation Purposes: Its Formation and Use]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ehkologiya. Prirodopol'zovanie = Vestnik of Volga Tech. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2022;4(56):47-73. (In Russ.). DOI: 10.25686/2306-2827.2022.4.47.

10. Porfir'ev B.N., Terent'ev N.E., Zinchenko Yu.V. *Planirovanie adaptacii k izmeneniyam klimata: mirovoj opyt i vozmozhnosti dlya ustojchivogo social'no-ehkonomicheskogo razvitiya Rossii* [Planningof Adaptation to Climate Change: World Experience and Opportunities for Sustainable Socio-EconomicDevelopment in Russia]. Problemy prognozirovaniya. 2023;2(197):154-168. (In Russ.). DOI: 10.47711/0868-6351-197-154-168.

11. Porfir'ev B.N., Kolpakov A.Yu., Lazeeva E.A. *Ocenka vliyaniya izmeneniya klimata na ehkonomiku Rossii s ispol'zovaniem modelej kompleksnoj ocenki (IAM).* Problemy prognozirovaniya. 2025;1(208):49-61. (In Russ.). DOI: 10.47711/0868-6351-208-49-61.

12. Onuchin A.A., Pimenova A.V., Sokolova V.A. *Sokhranenie biologicheskogo raznoobraziya i racional'noe ispol'zovanie lesov boreal'noj zony*. Vestnik Khabarovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2021;1(2):225-241. (In Russ.). DOI: 10.21603/2782-2435-2021-1-2-225-241.

13. Nazarenko N.N. *Sovremennye lesnye klimatopy i lesotipologicheskoe rajonirovanie yuzhnoj ravninnoj chasti Evropejskoj Rossii* [Modern forest climatopes and forest typological zoning of the southern part of the plain territory of European Russia]. Samarskij nauchnyj vestnik = Samara Journal of Science. 2023;12(1):68-77. (In Russ.). DOI: 10.55355/snv2023121114.

14. Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.YU., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M. *Rol' lesov v adaptacii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata* [A Role of Forests in Natural Systems Adaptation to Climate Change]. Lesovedenie. 2021;5:532-547. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114821050077.

15. Lobanov M.M., Zvezdanovich Lobanova E., Zvezdanovich M. Klimaticheskij diskurs v Rossii: ot dikhotomii klimaticheskogo soznaniya k chetyrem formam klimaticheskoj politiki [Climate Discourse in Russia: From the Dichotomy of Climate Consciousness to Four Forms of Climate Policy]. Mir Rossii. 2024433(3):141-169. (In Russ.). DOI: 10.17323/1811-038X-2024-33-3-141-169.

16. Sanseverino-Godfrin V., Garbolino E., Hinojos-Mendoza G. *Evolution of the legal prevention measures concerning forest fire risk in a context of climate change* // Safety Science. 2016;87:1-8. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.06.003.

17. Postnikova P.O., Parnikova S.P., Tananaev N.I., Parfenova O.T. *Vliyanie klimaticheskikh izmenenij na chastotu i intensivnost' lesnykh pozharov: perspektivy, posledstviya i riski* [Impact of climate change on the frequency and intensity of forest fires: perspectives, consequences and risks]. Ehkonomika. Sociologiya. Kul'turologiya. 2024; 1:56-62. (In Russ.). DOI: 10.25587/2587-8778-2024-1-56-62.

18. Lipka O.N. *Methodological approaches to climate change vulnerability assessment of protected areas*. Nature Conservation Research. 2017; 2(3):68-79. DOI: 10.24189/ncr.2017.036.

19. Chernenkova T.V., Kotlov I.P., Belyaeva N.G., Morozova O.V., Suslova E.G., Puzachenko M.Yu., Krenke A.N. *Sustainable Forest Management Tools For The Moscow Region*. Geography, Environment, Sustainability. 2019;12(4):35-56. DOI: https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-57.

20. Sokolova N.A. *Izmenenie klimata: razvitie mezhdunarodno-pravovogo regulirovaniya* [Climate Change: International Legal Regulation Development]. Aktual'nye problemy rossijskogo prava. 2021;16(12).:177-184. (In Russ.). DOI: 10.17803/1994-1471.2021.133.12.177-184.

21. Konstantinov A. V. *Scenarnyj podkhod k adaptacii lesnykh ehkosistem Rossijskoj Federacii v usloviyakh izmenenij klimata* [Scenario Approach to Adaptation of Forest Ecosystems in the Russian Federation under Climate Change]. Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2023;87(4):558-567. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S2587556623040039.

22. Klimenko V.V., Tereshin A.G., Mikushina O.V. *Increase of Energy Potential of Russian Forest Resources due to Climate Change and CO_2 Fertilization.* E3S Web of Conferences. 2019; 103:02005. DOI: 10.1051/e3sconf/201910302005.

Сведения об авторах

✉ *Константинов Артем Васильевич* – доктор биологических наук, заместитель директора по научной работе ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1864-9313,e-mail: science@spb-niilh.ru.

Бурцев Даниил Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела проблем изменения климата ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, доцент Факультета технологического менеджмента и инноваций Университета ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4825-1162, e-mail: dsburtcev@itmo.ru.

Гаврилюк Елена Сергеевна – кандидат экономических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела проблем изменения климата ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, доцент Факультета технологического менеджмента и инноваций Университета ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3869-1578, e-mail: gavrilyukes@itmo.ru.

Королева Татьяна Станиславна – доктор физико-математических наук, ученый секретарь ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4428-0193e-mail: koroleva@spb-niilh.ru.

Торшукова Зарина Александровна – главный специалист ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3331-8432, e-mail: z.torshukova@spb-niilh.ru.

Information about the authors

✉ *Artem V. Konstantinov* – Dr. Sci. (Biol.), Deputy Director for Scientific Work Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1864-9313, e-mail: science@spb-niilh.ru.

Daniil S. Burtcev – Cand. Sci. (Agric.), Researcher, Department of Climate Change Research, Saint Petersburg Research Institute of Forestry, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, Associate Professor, Faculty of Technological Management and Innovations, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, Saint Petersburg, Russian Federation, 197101, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4825-1162, e-mail: dsburtcev@itmo.ru.

Elena S. Gavrilyuk – Cand. Sci. (Econ.), Researcher, Department of Climate Change Research, Saint Petersburg Research Institute of Forestry, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, Associate Professor, Faculty of Technological Management and Innovations, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, Saint Petersburg, Russian Federation, 197101, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3869-1578, e-mail: gavrilyukes@itmo.ru.

Tatiana S. Koroleva – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Scientific Secretary Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4428-0193, e-mail: koroleva@spb-niilh.ru.

Zarina A. Torshukova – Chief Specialist Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3331-8432, e-mail: z.torshukova@spb-niilh.ru

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/28
УДК 630* 631.95:630.2

Циркулярное агролесоводство как основа трансформации агроэкосистем Краснодарского края

Мария В. Терёшина[1], mwstepanova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8982-5831
Елена А. Яковлева[2], elena-12-27@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9697-8024
Наталия В. Яковенко[2], n.v.yakovenko71@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4203-0040
[1]*Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, 350040, Российская Федерация*
[2]*Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф.Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация*

В статье обоснована концепция циркулярного агролесоводства как практического инструмента для проектирования устойчивых агроэкосистем, основанных на принципах замкнутых циклов вещества и энергии. Цель исследования заключалась в комплексной оценке потенциала внедрения данной модели в агроэкосистемах Краснодарского края и разработке научно обоснованной схемы трансформации традиционных сельскохозяйственных систем. Методология исследования включала системный анализ научных источников, нормативно-правовой базы и статистических данных, а также сравнительную оценку эффективности различных систем землепользования. На основе детального анализа природно-климатических, экологических и социально-экономических условий региона была разработана дифференцированная система циркулярных агролесоводческих решений для ключевых природных зон Краснодарского края. Результаты исследования демонстрируют, что циркулярное агролесоводство, в отличие от традиционного, обеспечивает синергический эффект за счет многофункциональности, повышенной устойчивости к климатическим стрессам и способности к саморегуляции. Предложена поэтапная схема перехода, включающая анализ текущих условий, планирование, практическую реализацию пилотных проектов и последующее масштабирование. Для каждой зоны (Черноморское побережье, предгорья, равнинная часть, Приазовье и урбанизированные территории) разработаны специфические решения, направленные на регенерацию почв, минимизацию отходов, рациональное водопользование и интеграцию возобновляемых источников энергии.

Делается вывод о том, что внедрение циркулярного агролесоводства представляет собой стратегически важное направление для трансформации агропромышленного комплекса Краснодарского края в сторону ресурсоэффективности, экологической стабильности и социально-экономической устойчивости. Успешная реализация данной модели требует разработки адекватной нормативной базы, экономических стимулов и консолидации усилий государства, бизнеса и местных сообществ.

Ключевые слова: циркулярная экономика, Краснодарский край, агролесоводство, устойчивое развитие, биоразнообразие, ресурсосбережение.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и КНФ в рамках конкурса 2024 г. «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» (региональный конкурс), 24-18-20049 «Региональная система экономики замкнутого цикла: институциональные модели и технологии развития (на примере Краснодарского края)»; https://rscf.ru/project/24-18-20049/.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Терёшина М.В. Циркулярное агролесоводство как основа трансформации агроэкосистем Краснодарского края / М.В. Терёшина, Е.А. Яковлева, Н.В. Яковенко // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т.15. – №. 4 (60). – С. 473-492. – *Библиогр.: с. 488-492 (31 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/28.

Поступила 12.06.2025. ***Пересмотрена*** 15.09.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Circular agroforestry as a basis for transformation of agroecosystems of Krasnodar Region

Maria V. Tereshina[1], mwstepanova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8982-5831

Elena A. Yakovleva[2], elena-12-27@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9697-8024

Nataliya V. Yakovenko[2], n.v.yakovenko71@gmail.com , https://orcid.org/0000-0003-4203-0040

[1]*Kuban State University, 149 Stavropol Street, Krasnodar, 350040, Russian Federation*

[2]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

The article substantiates the concept of circular agroforestry as a practical tool for designing sustainable agroecosystems based on the principles of closed cycles of matter and energy. The aim of the study was a comprehensive assessment of the potential for implementing this model in the agroecosystems of the Krasnodar Region and the development of a scientifically based scheme for transforming traditional agricultural systems. The research methodology included a systematic analysis of scientific sources, regulatory frameworks and statistical data, as well as a comparative assessment of the effectiveness of various land use systems. Based on a detailed analysis of the natural, climatic, environmental and socio-economic conditions of the region, a differentiated system of circular agroforestry solutions for the key natural zones of the Krasnodar Region was developed. The results of the study demonstrate that circular agroforestry, unlike traditional methods, provides a synergistic effect due to its multifunctionality, increased resilience to climatic stresses and self-regulating capacity. A step-by-step transition scheme has been proposed, including an analysis of current conditions, planning, practical implementation of pilot projects and subsequent scaling. For each zone (Black Sea coast, foothills, lowland areas, Priazovye and urbanized territories), specific solutions have been developed aimed at soil regeneration, waste minimization, rational water use and the integration of renewable energy sources. It is concluded that the introduction of circular agroforestry is a strategically important direction for the transformation of the agro-industrial complex of the Krasnodar Region towards resource efficiency, environmental stability and socio-economic sustainability. The successful implementation of this model requires the development of an adequate regulatory framework, economic incentives and the consolidation of efforts by the state, businesses and local communities.

Keywords: circular economy, Krasnodar Region, agroforestry, sustainable development, biodiversity, resource conservation.

Financing: The research is carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project 2024 Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups" (regional competition), project No. 24-18-20049 "Regional circular economy system: institutional models and development technologies (the case of Krasnodar Krai)"; https://rscf.ru/project/24-18-20049/.

Acknowledgements: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: The authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Tereshina M.V., Yakovleva E.A., Yakovenko N.V. Circular Agroforestry as the Basis for the Transformation of Agroecosystems in the Krasnodar Region. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 473-492 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/28.

Received 12.06.2025. ***Reviewed*** 15.09.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Циркулярное агролесоводство представляет собой интегративную научную дисциплину и практическую реализацию целенаправленного проектирования и управления устойчивыми агроэкосистемами, которые сочетают древесные многолетники с сельскохозяйственными культурами и/или животными на одной единице площади [1]. Данный подход операционализирует принципы циркулярной экономики, направленные на создание замкнутых циклов вещества и энергии и минимизацию потерь [2].

Теоретической основой циркулярного агролесоводства служит синтез принципов агроэкологии, устойчивого лесоводства и циркулярной экономики, что противопоставляется традиционной линейной модели «взял-произвел-выбросил» [3]. Современные исследования в данной области сместились от описания традиционных практик к количественной оценке взаимодействий между компонентами системы, включая анализ конкурентных отношений, круговорота биогенных элементов и экономической рентабельности [4].

Ключевым атрибутом циркулярных агролесоводческих систем является их многофункциональность и способность к саморегуляции. Системы с высоким уровнем биоразнообразия демонстрируют повышенную устойчивость к болезням, вредителям и климатическим стрессам [5].

Интеграция деревьев способствует более эффективному круговороту питательных веществ, выполняя функцию «биологических насосов», извлекающих элементы питания из глубоких почвенных горизонтов [6]. Использование азотфиксирующих видов позволяет существенно сократить применение синтетических удобрений, минимизируя зависимость от ископаемых ресурсов [7].

Внедрение циркулярных агролесоводческих практик оказывает комплексное влияние на социально-экономическое развитие сельских территорий. Исследования показывают, что диверсификация продукции в таких системах снижает экономические риски фермерских хозяйств и повышает их финансовую устойчивость [8]. Комбинирование различных культур и деревьев обеспечивает более стабильное производство продуктов питания в условиях климатической изменчивости [9].

Значительный вклад циркулярного агролесоводства заключается в обеспечении ключевых экосистемных услуг. Мета-анализ глобальных исследований подтверждает значительный потенциал агролесоводческих систем к секвестрации углерода как в древесной биомассе, так и в почве [10].

Обеспечивая специфические экологические ниши, микроклиматическую гетерогенность и структурное разнообразие, эти системы поддерживают значительно большее биоразнообразие по сравнению с монокультурами [11]. Древесный компонент также способствует улучшению гидрологического режима почв, снижая риски эрозии и повышая эффективность использования влаги.

Несмотря на значительный потенциал, широкомасштабное внедрение циркулярного агролесоводства сталкивается с институциональными и социально-экономическими барьерами, включая фрагментированное управление ресурсами, отсутствие целостной нормативно-правовой базы и ограниченный доступ к финансированию.

Перспективы развития связаны с интеграцией агролесоводства в климатическую политику и программы Payments for Ecosystem Services (PES), а также с разработкой прецизионных методов мониторинга продуктивности и экосистемных функций.

Таким образом, циркулярное агролесоводство представляет собой перспективную научную платформу и практический инструмент для трансформации современных агропромышленных систем в направлении устойчивости, ресурсоэффективности и климатической повестке.

Цель исследования заключается в комплексной оценке потенциала внедрения модели циркулярного агролесоводства в агроэкосистемах Краснодарского края и разработке научно обоснованной схемы трансформации традиционных сельскохозяйственных систем в замкнутые многофункциональные комплексы.

Материалы и методы

Исследование базируется на комплексном методологическом подходе, интегрирующем теоретический анализ и эмпирическую оценку. Теоретическую основу составили научные публикации отечественных и зарубежных авторов, исследующие проблемы организации агролесоводческих систем, повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий и сохранения биоразнообразия, а также нормативно-правовые акты, регулирующие сферу землепользования и природоохранной деятельности в Краснодарском крае.

Эмпирическая база сформирована на основе официальной статистической отчетности федеральных и региональных органов власти, данных о состоянии агролесомелиоративных насаждений и материалах, отражающих практический опыт внедрения агролесоводческих моделей в регионе.

В процессе исследования был применен системный анализ научных источников и нормативной базы. Теоретической основой послужили методы оценки продуктивности агроэкосистем, прогнозирования климатических изменений и моделирования агролесоводческих систем. Эмпирическая проверка гипотез осуществлялась посредством статистического анализа показателей урожайности и динамики почвенного плодородия. Сравнительная оценка эффективности различных систем землепользования дополнена пространственным анализом распределения агролесоводческих ландшафтов и их влияния на экологическое состояние территории.

Такой многоаспектный методологический подход позволил получить репрезентативные результаты и сформулировать научно обоснованные выводы о перспективах развития агролесоводства в условиях Краснодарского края.

Результаты и обсуждение

Концепция агролесоводства, получившая научное оформление в работах John Bene в 1973 году, нашла многогранное практическое подтверждение в различных эколого-географических условиях. Значительный вклад в развитие данной дисциплины внесли фундаментальные исследования P.K.R. Nair, в которых систематизированы накопленные за четыре десятилетия знания о механизмах взаимодействия в системе «древесная растительность – сельскохозяйственные культуры – почва» [12]. В его работах доказана роль агролесоводческих систем в повышении плодородия почв, оптимизации водного режима, сохранении агробиоразнообразия, а также в усилении устойчивости агроэкосистем к климатическим стрессорам и снижении процессов эрозии.

Современный этап развития агролесоводства характеризуется активной интеграцией биотехнологических и цифровых подходов. Как отмечают Jagdish Chander Dagar et al., перспективным направлением является использование достижений генной инженерии и микробиологии для повышения устойчивости древесных компонентов и оптимизации их взаимодействия с культурами [13]. Наряду с этим, актуализируется необходимость применения геоинформационных систем, дистанционного зондирования и прогностического моделирования для мониторинга и планирования развития агролесоводческих ландшафтов. Разработка

высокопродуктивных и адаптивных сортов деревьев, а также внедрение средств механизации и интеллектуальных систем управления на основе больших данных и искусственного интеллекта определяют технологический облик агролесоводства будущего.

Экосистемная и социально-экономическая эффективность агролесоводства получает всестороннее подтверждение. Исследование Castle et al. (2022) демонстрирует его положительное влияние на широкий спектр экосистемных услуг и благосостояние человека в странах с высоким уровнем доходов [14]. Установлено, что комбинирование древесных и сельскохозяйственных компонентов способствует диверсификации источников дохода фермерских хозяйств, улучшает питание и обеспечивает дополнительные ресурсы, что в совокупности ведет к росту экономической стабильности и социального благополучия.

В контексте перехода к устойчивым моделям экономики агролесоводство рассматривается как ключевой элемент циркулярной биоэкономики. Согласно анализу, представленному Trigkas et al., агролесоводческие системы вносят вклад в устойчивое использование природных ресурсов, секвестрацию углерода и повышение биоразнообразия [15]. Интеграция инновационных биотехнологий и методов управления земельными ресурсами позволяет оптимизировать продуктивность таких систем, одновременно усиливая их экологические функции. Схемы циркулярной биоэкономики, поддерживающие замкнутые циклы использования материалов и энергии, способствуют сокращению отходов и повышению экономической устойчивости сельских территорий.

Проведенный анализ позволяет выделить принципиальные отличия циркулярного агролесоводства от традиционного. Его методологической основой выступают принципы замкнутого цикла использования ресурсов, минимизации потерь и максимизации полезного использования всех компонентов агроэкосистемы [16-18]. Ключевыми характеристиками являются многофункциональность, проявляющаяся в синергическом сочетании средообразующих, продукционных и почвозащитных функций, а также повышенная устойчивость к внешним воздействиям, включая способность к митигации последствий изменения климата.

Замкнутый ресурсный цикл подразумевает возврат органических остатков в почву, компостирование, сокращение потребности во внешних ресурсах. Многофункциональность проявляется в объединении функций защиты почвы, восстановления плодородия, повышения продуктивности и улучшении экологической ситуации. А также следует обратить внимание на высокую устойчивость циркулярного агролесоводства и митигацию последствий изменения климата (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика традиционного и циркулярного агролесоводства
Table 1. Comparative characteristics of traditional and circular agroforestry

Характеристики / Characteristics	**Традиционное агролесоводство / Traditional Agroforestry**	**Циркулярное агролесоводство / Circular Agroforestry**
Основные принципы / Basic Principles	Максимальное получение древесины и материальных ресурсов / Maximum obtainment of timber and material resources Монофункциональная модель, ориентированная на заготовку древесины / Monofunctional model focused on timber harvesting	Ориентация на принципы устойчивого развития и сохранения экосистем / Based on principles of sustainable development and ecosystem conservation / Многофункциональное использование леса (экология, биоразнообразие, рекреация, климат) / Multifunctional forest use considering ecology, biodiversity,

	Проведение сплошных рубок с последующим восстановлением путем посадок / Clear-cutting and restoration using planting / Рассмотрение леса исключительно с ресурсной точки зрения / Forest is viewed exclusively from a resource perspective	recreation, climate / Минимизация отходов и максимальное повторное использование всех лесных ресурсов / Waste minimization and maximum reuse of all forest resources Рассмотрение леса как циклической системы с замкнутыми потоками веществ / Forest is viewed as a cyclic system with closed substance flows
Подход к управлению / Management Approach	Линейная модель: выращивание → рубка → переработка → отходы / Linear resource use model: cultivation - logging - processing - waste / Игнорирование экологических последствий вырубки / Ignoring ecological consequences of deforestation / Использование монокультур, снижающее биологическое разнообразие / Use of monocultures reducing biological diversity	Замкнутый цикл: отходы перерабатываются в новые продукты или используются для воспроизводства / Application of closed cycle: waste is recycled into new products or used for reproduction Поддержание биологических и экосистемных функций / Maintenance of biological and ecosystem functions Смешанные насаждения, повышающие устойчивость к болезням и изменению климата / Mixed stands increasing diversity of tree species to enhance resilience to diseases and climate change
Экологические аспекты / Ecological Aspects	Риск деградации почв, утраты биоразнообразия и эрозии / Possible soil degradation, biodiversity loss, erosion Уязвимость монокультур к вредителям и изменению климата / Monocultures vulnerable to pests and climate change Применение химикатов для борьбы с вредителями и болезнями / Use of chemicals for pest and disease control	Поддержание почвенного плодородия, качества воды и воздушного баланса / Maintenance of soil fertility, water quality and air balance Способствование сохранению и восстановлению экосистемных функций / Contributes to preservation and restoration of ecosystem functions Основывается на экологически безопасных методах и натуральных процессах / Based on environmentally safe methods and natural processes
Социально-экономические аспекты / Socio-Economic Aspects	Продажа древесины и лесоматериалов как основной источник дохода / Sale of timber and wood materials as main income source / Недостаточное развитие экологического образования и просвещения / Insufficient development of environmental education and awareness	Вовлеченность местных сообществ, развитие экологического туризма / Involvement of local communities, development of ecotourism / Создание новых рабочих мест в сфере переработки отходов и экологического мониторинга / Creation of new jobs in waste collection, processing and environmental monitoring

		/ Повышение уровня социальной ответственности и экологической культуры / Increased level of social responsibility and environmental culture

По нашему мнению, традиционное лесоводство более узконаправлено на получение экономической выгоды, извлекаемой при коммерческой эксплуатации лесных ресурсов, предусматривающей заготовку древесины без должного внимания к долгосрочным последствиям для экосистемы. Предпочтение отдается быстрорастущим хвойным деревьям, которые обеспечивают высокую доходность, однако снижают биоразнообразие и делают экосистему уязвимой перед болезнями и насекомыми-вредителями. Традиционная практика зачастую игнорирует или недооценивает последствия массового изъятия древесины для экосистемы, включая потерю биоразнообразия, ухудшение качества почвы, нарушение водного баланса и изменение микроклимата. Применение циркулярного подхода в лесоводстве позволяет учитывать цикличность природных процессов, сохранение биоразнообразия и социальные интересы. Предлагается максимально полно использовать все компоненты лесной экосистемы, а именно древесина подвергается глубокой комплексной переработке, отходы используются для получения биогаза, компоста, строительных материалов и другой продукции, что повышает эффективность использования ресурсов. Кроме того, современные методы агролесоводства включают борьбу с пожарами, охрану редких видов флоры и фауны, восстановление деградированных земель и повышение качества воздуха и воды [19-21].

Таким образом, переход от традиционного лесоводства к циркулярному агролесоводству обеспечивает сбалансированное сочетание экономического роста, охраны природы и социальной ответственности, что особенно актуально в условиях глобального изменения климата и нарастающего дефицита природных ресурсов [21-23].

Для успешной реализации циркулярного агролесоводства необходимо объединить следующие элементы [24-29]:

1. Агролесоводческая система, включающая выращивание деревьев и кустарников с целью защиты почвы, снижения эрозии, накопления органического вещества и улучшения микроклимата, а также сельскохозяйственных культур.

2. Система компостирования и переработки растительных остатков, соломы, листьев и других органических материалов в удобрение, возвращаемое в почву. Вермикомпостирование предусматривает использование червей для ускоренного разложения органических отходов и создания высококачественного компоста.

3. Эффективное использование водных ресурсов, предусматривающее минимизацию расхода воды путем точечного полива корневой зоны растений, установку резервуаров для сбора и хранения дождевых осадков, использование дренажных систем.

4. Эффективная электроэнергетика и возобновляемые источники энергии посредством использования солнечных панелей, ветрогенераторов и биогазовых установок для выработки электроэнергии и тепла, переработке органических отходов в газ и жидкое удобрение.

5. Природоохранные мероприятия, включающие посадку деревьев вдоль границ полей и дорог для защиты от ветра и пыли, восстановление деградированных земель путем высадки деревьев и многолетних трав.

Таблица 2

Сравнительная характеристика отличительных особенностей традиционного и циркулярного агролесоводства

Table 2

Comparative characteristics of distinctive features of traditional and circular forestry

Характеристики	Традиционное агролесоводство	Циркулярное агролесоводство
Основные принципы	- максимальное получение древесины и материальных ресурсов; - монофункциональная модель, ориентированная на заготовку древесины; - резкие рубки и восстановление с применением посадок; - лес рассматривается исключительно с ресурсной точки зрения	- опирается на принципы устойчивого развития и сохранения экосистем; - многофункциональное использование леса, с учетом таких аспектов, как экология, биоразнообразие, рекреация, климат; - минимизация отходов и максимальное повторное использование всех лесных ресурсов; - лес рассматривается как циклическая система с замкнутыми потоками веществ
Подход к управлению лесами	- линейная модель использования ресурсов: выращивание-рубка-переработка-отходы; - игнорирование экологических последствий вырубки лесов; - использует монокультуры, что снижает биологическое разнообразие	- применение замкнутого цикла: отходы перерабатываются в новые продукты или используются для воспроизводства; - поддержание биологических и экосистемных функций; - смешанные насаждения, увеличение разнообразия древесных видов для повышения устойчивости к болезням и изменению климата
Экологические аспекты	- не исключены деградация почв, утрата биоразнообразия, эрозии; - монокультуры уязвимы к вредителям и изменению климата; - применение химикатов для борьбы с вредителями и болезнями	- поддержание почвенного плодородия, качества воды и воздушного баланса; - способствует сохранению и восстановлению экосистемных функций; - основывается на экологически безопасных методах и натуральных процессах
Социально-экономические аспекты	- продажа древесины и лесоматериалов выступает основным источником дохода; - недостаточное развитие экологического образования и просвещения	- включенность местных сообществ, развитие экологического туризма; - создание новых рабочих мест в сборе, переработке отходов и экологическом мониторинге; - повышение уровня социальной ответственности и экологической культуры

В Краснодарском крае практика циркулярного агролесоводства приобретает особое значение в связи с высокой лесообеспеченностью и экономической ролью лесов. Площадь Краснодарского края составляет 7548,5 тыс. га. Из этого общего объема, земли сельскохозяйственного назначения занимают 4680,8 тыс. га, что означит, что более половины территории края используется для сельскохозяйственных нужд [30]. Структура земельного фонда Краснодарского края по состоянию на 01.01.2025 г. представлена на рис.1.

Площадь земель сельскохозяйственного назначения в 2024 г. по сравнению с 2023 г. не изменилась. Земли населенных пунктов увеличились на 6,2 тыс. га за счет изменения границ

и включения земель сельхоз назначения и промышленности. Земли промышленности, транспорта, связи и иного назначения увеличились на 0,1 тыс. га из-за перевода земель из категорий сельхоз назначения и населенных пунктов. Земли особо охраняемых территорий и объектов уменьшились в связи с увлечением земель населённых пунктов. Земли лесного фонда уменьшились на 2,7 тыс. га, что произошло за счет перевода земель в категорию земель населенных пунктов и земель особо охраняемых территорий. Земли водного фонда уменьшились на 0,4 тыс. га, так как часть была переведена в сельскохозяйственные земли. Земли запаса сократились на 0,2 тыс. га из-за перевода в земли населенных пунктов [31].

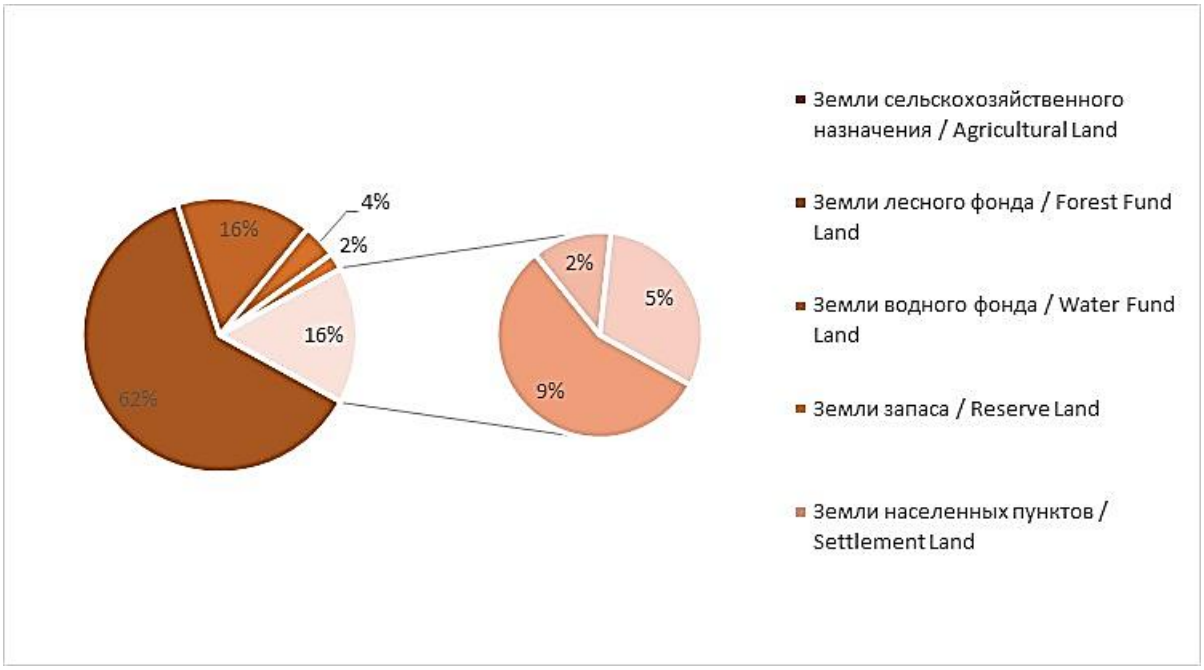


Рисунок 1. Структура земельного фонда Краснодарского края
Figure 1. The structure of the Krasnodar Region's land fund
Источник: собственная композиция авторов
Source: the authors' own composition

Леса Краснодарского края включают широколиственные и хвойные породы, характерные для влажного субтропического климата. Общая площадь лесов -1698,0 тыс. га. Из них по категориям земель [30]:

- леса на землях лесного фонда – 1265,2 тыс. га (74,5% от площади лесов);
- леса на землях обороны и безопасности – 33,9 тыс. га;
- леса на землях населенных пунктов – 0,6 тыс га;
- леса на землях особо охраняемых территорий (ООПТ) – 384,8 тыс. га;
- леса на землях иных категорий – 13.5 тыс. га.

Лесистость территории Краснодарского края составляет 22,5% и определяется по формуле:

$L = (F_l / F_t) \times 100\%$,

где L – лесистость территории (%),

F_l – площадь лесов ($км^2$ или га),

F_t – общая площадь территории Краснодарского края ($км^2$ или га).

Этот показатель считается средним среди регионов РФ и отражает баланс между природными лесами и активно развиваемыми сельскохозяйственными урбанизированными территориями, демонстрирует наличие значительных лесных массивов, важных для

экологии, почвозащиты, климата и рекреации региона, но леса не доминируют над другими типами земель.

Анализ распределения лесного покрова Краснодарского края свидетельствует о его концентрации преимущественно на землях лесного фонда при значительной доле лесов, расположенных на особо охраняемых природных территориях. Высокий показатель лесистости отражает существенный экологический потенциал и степень сохранности лесных экосистем региона.

Лесной фонд характеризуется значительным эксплуатационным запасом древесины с выраженной доминантой твердолиственных пород, что определяет качественные особенности и направления использования лесных ресурсов. Площадь лесных культур составляет 109,5 тыс. га, или 8,7% от общей площади лесного фонда, при общем запасе древесины 223,54 млн. м³.

Структура породного состава лесных насаждений демонстрирует абсолютное преобладание твердолиственных пород (85,5%), тогда как хвойные породы занимают 4,4%, мягколиственные - 6,0%, а прочие древесные породы - 4,1%. Такая породная структура формирует уникальные экосистемные характеристики и определяет специализацию лесопользования в регионе.

Агролесоводство в Краснодарском крае представляет собой научно обоснованную систему комплексного землепользования, интегрирующую лесохозяйственные и сельскохозяйственные компоненты для достижения устойчивого развития территорий. Пространственная организация агролесоводческих систем формируется под влиянием природно-климатических, экологических и социально-экономических факторов, образующих взаимосвязанный комплекс детерминант территориального планирования.

Климатическая неоднородность территории Краснодарского края выступает ключевым фактором дифференциации агролесоводческих систем. Умеренно-континентальный климат равнинной части с выраженными сезонными колебаниями температур определяет необходимость применения морозоустойчивых древесных пород и специализированных агротехнических приемов, направленных на сохранение почвенной влаги и предотвращение эрозионных процессов. Для черноморского побережья характерна смена климатических режимов от полусухого средиземноморского до влажного субтропического, что находит отражение в подборе соответствующих древесных видов - от засухоустойчивых до влаголюбивых быстрорастущих пород.

Орографические особенности региона создают предпосылки для формирования двух основных зон агролесоводства. Равнинная северная часть с преобладанием высокоплодородных черноземов ориентирована на интенсивное сельскохозяйственное производство с интеграцией защитных лесных насаждений. Горная южная территория, характеризующаяся сложным рельефом и высотной зональностью, обладает значительным потенциалом для развития многофункциональных лесоагросистем, сочетающих лесопользование с возделыванием специализированных культур.

Экологическая составляющая агролесоводства проявляется в способности интегрированных систем обеспечивать устойчивость агроландшафтов. Древесно-кустарниковые компоненты выполняют стабилизирующие функции, снижая эрозионные процессы, улучшая водный режим и повышая биоразнообразие. Особое значение приобретает организация агролесоводческих систем вдоль водоохранных зон и на склоновых землях, где они выступают естественным барьером для деградационных процессов.

Экономическая эффективность агролесоводческих систем достигается через диверсификацию производства и оптимизацию земельных ресурсов. Комбинирование различных видов деятельности позволяет снижать финансовые риски и повышать рентабельность землепользования. Существенную роль играет proximity к рынкам сбыта и транспортной инфраструктуре, а также наличие мер государственной поддержки.

Социально-экологическое значение агролесоводства заключается в создании дополнительных рабочих мест, улучшении качества

жизни сельского населения и повышении устойчивости территорий к климатическим изменениям. В условиях нарастающей антропогенной нагрузки на агроландшафты края, внедрение интегрированных систем способствует сохранению природного потенциала при одновременном обеспечении социально-экономического развития.

Реализация принципов циркулярного агролесоводства в Краснодарском крае основывается на адаптивном подходе, учитывающем локальные почвенно-климатические условия и экономическую специализацию территорий. Применение аллельных систем и сильвопастбищного хозяйства позволяет создавать сбалансированные агроэкосистемы, обеспечивающие замкнутость циклов вещества и энергии при сохранении продуктивности земель.

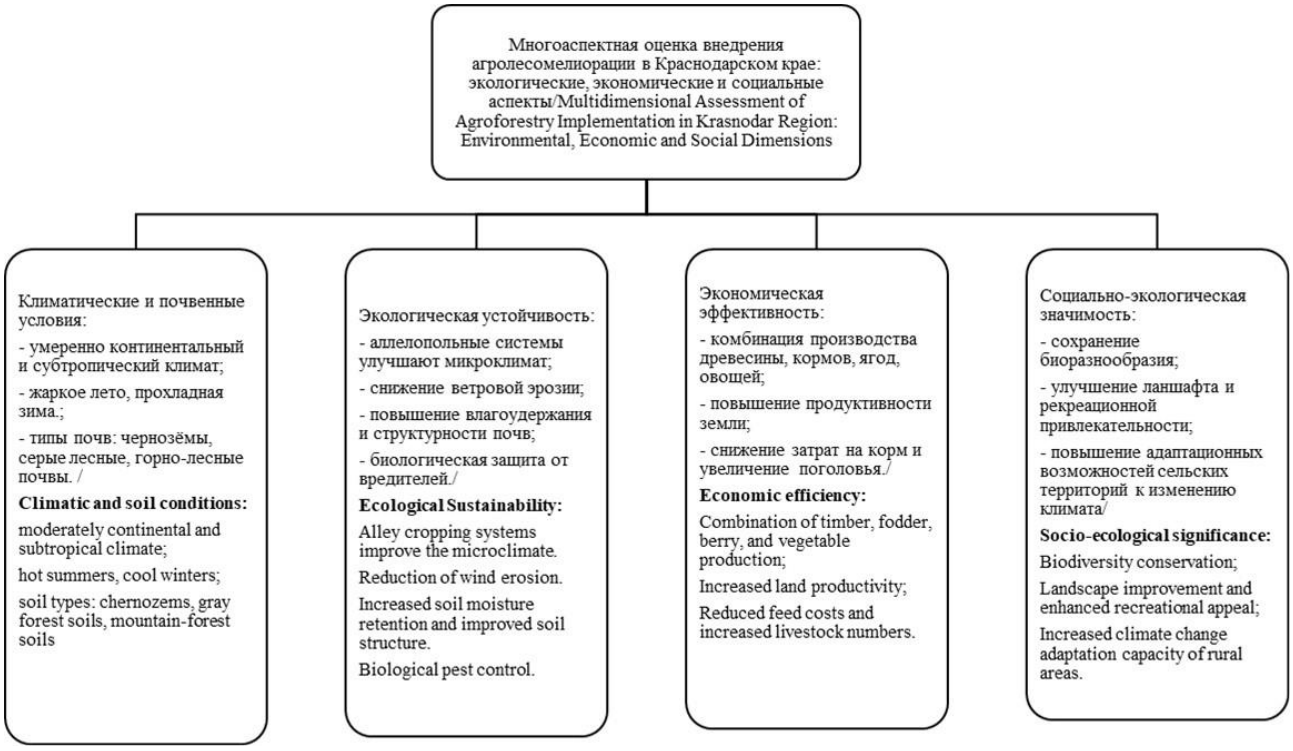


Рисунок 2. Многоаспектная оценка внедрения агролесомелиорации в Краснодарском крае: экологические, экономические и социальные аспекты

Figure 2. Multidimensional Assessment of Agroforestry Implementation in Krasnodar Region: Environmental, Economic and Social Dimensions

Источник: собственная композиция авторов

Source: the authors' own composition

Процесс перехода к циркулярному агролесоводству представляет собой последовательную цепочку шагов, направленных на устойчивое развитие сельских территорий, эффективное использование природных ресурсов и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду (рис 3).

На первом этапе проводится анализ текущих условий и факторов, влияющих на возможность внедрения циркулярного агролесоводства, а именно оцениваются состояние окружающей среды и природно-климатические особенности

Краснодарского края (климат, состояние почв, доступность и качество водных ресурсов, состояние воздушного бассейна, биоразнообразие), текущие способы ведения хозяйственной деятельности (используемые технологии, степень нагрузки на природу, применяемые ресурсы), выявляются существующие проблемы (эрозия почв, засоленность, дефицит влаги, деградация лесных угодий, негативное воздействие на водные объекты), изучаются возможности и ограничения (климатические условия, наличие свободных площадей, варианты использования отходов производства). В результате анализа и формулируются цели внедрения циркулярного агролесоводства, к числу которых можно отнести, например, улучшение состояния почвенного покрова и повышение плодородности земли, минимизация выбросов углекислого газа и других вредных веществ, увеличение биоразнообразия и сохранения природных экосистем, эффективное использование водных ресурсов и предотвращение деградации водоемов, социальная адаптация местных жителей к новым методам хозяйствования. В соответствии с поставленными целями разрабатываемый план мероприятий включает выбор эффективных агролесоводческих практик (создание защитных лесных полос, внедрение аллейных посадок, создание агролесных экосистем), оптимизацию внедрение методов эффективного использования водных ресурсов (капельное орошение, дождевание, создание прудов-отстойников), переработка и утилизация отходов растениеводства и животноводства (получение биогаза, биоуголь, кормовая продукция), применение цифровых технологий и автоматизированных систем мониторинга (дистанционные сенсоры, спутниковые данные, системы точного земледелия), обучение и подготовка кадров (организация тренингов, семинаров, образовательных программ для специалистов).

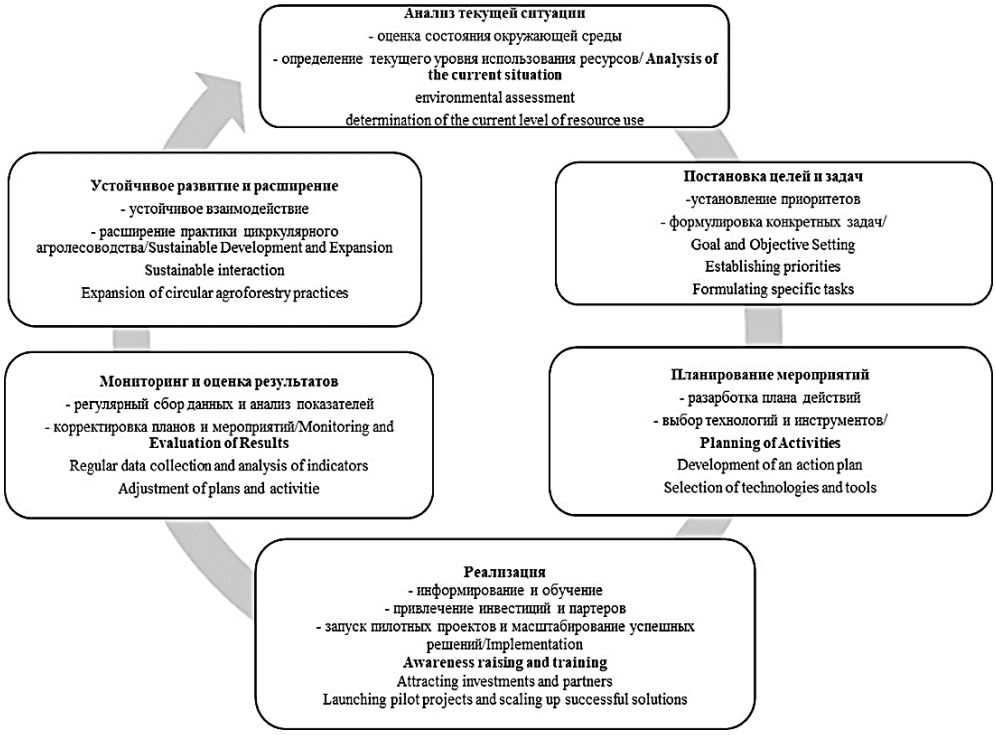


Рисунок 3. Схема перехода к циркулярному агролесоводству в Краснодарском крае
Figure 2. The scheme of transition to circular agroforestry in the Krasnodar Region
Источник: собственная композиция авторов
Source: the authors' own composition

На этапе практической реализации разработанного плана происходит поиск источников финансирования, к которым можно отнести госпрограммы поддержки сельского хозяйства, гранты, субсидии, частное инвестирование. Запускаются пилотные проекты и демонстрационные площадки для проверки предложенных технологий и методик. Это должно сопровождаться организацией демонстрации и популяризации успешных практик среди предпринимателей и населения. Сопровождение процесса реализации постоянным мониторингом промежуточных результатов позволяет своевременно выявить проблемы и вносить необходимы изменения. Постоянный сбора и анализ данных о состоянии почв, экономии воды, повышении урожайности, сокращение выбросов парниковых газов.

Заключительный этап связан с закреплением и масштабированием положительных результатов на субъекты РФ со схожими природно-климатическими условиями, сетевым обменом опыта, дальнейшая поддержка на региональном уровне инициатив и проектов, способствующих реализации концепции циркулярного агролесоводства.

На основе комплексного анализа физико-географических, эколого-экономических и агротехнических условий Краснодарского края разработана дифференцированная система циркулярных агролесоводческих решений для основных природно-климатических зон региона. (табл.2).

Для Черноморского побережья и предгорий Кавказа, характеризующихся влажным субтропическим климатом и интенсивным рекреационным использованием, предлагается внедрение системы буферных зеленых коридоров и защитных полос на основе местных дендрологических видов. Это обеспечит стабилизацию эрозионно-опасных склонов и улучшит микроклиматические параметры. Агротехнические мероприятия включают создание террасированных многовидовых садовых фитоценозов с применением мульчирования из местных органических материалов. Циркулярность системы достигается через организацию кластеров по переработке органических отходов агропромышленного комплекса в компосты и биогумус, а также интеграцию возобновляемых источников энергии - солнечных панелей и малых гидроэлектростанций на горных водотоках.

Таблица 2

Циркулярные агролесоводческие решения по природно-климатическим зонам Краснодарского края

Table 2

Circular agroforestry solutions for the natural and climatic zones of the Krasnodar Region

Природно-климатическая зона / Natural-Climatic Zone	Особенности / Characteristics	Расширенные циркулярные решения / Expanded Circular Solutions
Черноморское побережье и предгорье Кавказа / Black Sea Coast and Foothills of the Caucasus	Мягкий климат, развитый туризм, виноградники, цитрусовые сады, чайные плантации. / Mild climate, developed tourism, vineyards, citrus orchards, tea plantations.	- Зеленые коридоры и защитные полосы для связи экосистем и защиты от эрозии. / Green corridors and protective belts to connect ecosystems and prevent erosion. - Использование органических отходов виноделия и сельского хозяйства: производство компоста и биогумуса. / Utilization of organic waste from winemaking and agriculture: production of compost and vermicompost. - Внедрение агровольтаики - совмещение солнечных панелей с сельхозкультурами. / Implementation of agrivoltaics - combining solar panels with agricultural crops.

		- Развитие сильвопастбищных систем - выпас животных в садах для борьбы с сорняками. / Development of silvopastoral systems - grazing animals in orchards to control weeds.
Предгорье и горные районы / Foothills and Mountain Areas	Богатые леса, высокогорные луга, ограниченные возможности для традиционного сельского хозяйства. / Rich forests, alpine meadows, limited opportunities for traditional agriculture.	- Сохранение естественных экосистем и восстановление деградированных земель. / Preservation of natural ecosystems and restoration of degraded lands. - Устойчивое лесопользование: переработка древесных отходов в щепу и биотопливо. / Sustainable forest management: processing wood waste into chips and biofuel. - Экотуризм и агротуризм с акцентом на образование в области циркулярной экономики. / Ecotourism and agritourism with a focus on circular economy education. - Заготовка недревесных лесных продуктов (грибы, ягоды, лекарственные травы). / Harvesting of non-timber forest products (mushrooms, berries, medicinal herbs).
Средняя зона (Краснодарская низменность) / Central Zone (Krasnodar Lowland)	Плодородные черноземы, развитое сельское хозяйство, интенсивное животноводство. / Fertile chernozems, developed agriculture, intensive livestock farming.	- Создание защитных лесополос для уменьшения ветровой эрозии. / Creation of protective forest belts to reduce wind erosion. - Регенерация почв: использование компоста и биоугля из отходов. / Soil regeneration: use of compost and biochar from waste. - Биогазовые установки для переработки навоза и агроотходов в энергию. / Biogas plants for processing manure and agricultural waste into energy. - Точное земледелие и системы капельного орошения для экономии воды. / Precision agriculture and drip irrigation systems to save water.
Приазовская зона / Priazovskaya Zone	Солончаки, засоленные почвы, высокая вероятность подтоплений, развитие аквакультур. / Salt marshes, saline soils, high flood risk, development of aquaculture.	- Внедрение солевыносливых культур для укрепления кормовой базы. / Introduction of salt-tolerant crops to strengthen the forage base. - Аквапонные и гидропонные системы с замкнутым циклом воды. / Aquaponic and hydroponic systems with a closed water cycle. - Фиторемедиация - использование растений для очистки сточных вод. / Phytoremediation - using plants to purify wastewater.

		- Создание рекреационных зон с использованием очищенной воды. / Creation of recreational areas using purified water.
Центральная зона (город Краснодар) / Central Zone (Krasnodar City)	Высокая урбанизированность, большое потребление и образование отходов. / High urbanization, high consumption and waste generation.	- Городское озеленение и вертикальное садоводство с использованием компоста. / Urban greening and vertical gardening using compost. - Фермерские кооперативы по переработке органических отходов. / Farmers' cooperatives for processing organic waste. - Образовательные экологические маршруты и программы. / Educational ecological routes and programs. - Развитие городских лесопарков как «зеленых легких». / Development of urban forest parks as «green lungs».

В предгорных и горных районах с их сложной орографией и ценными лесными экосистемами приоритетом является сохранение биологического разнообразия и восстановление деградированных земель. Рекомендуется развитие экологического и агротуризма с минимальной рекреационной нагрузкой, внедрение систем устойчивого лесопользования с глубокой переработкой древесных отходов. Традиционное пастбищное животноводство предлагается трансформировать в регулируемые сильвопастбищные системы, дополнив их рациональным использованием недревесных лесных ресурсов.

На территории Азово-Кубанской равнины с ее высокопродуктивными черноземами необходимо создание комплексной системы защитных лесных полос для борьбы с ветровой эрозией и оптимизации микроклимата. Регенерация почвенного плодородия должна осуществляться через системное применение органоминеральных удобрений на основе компостов и биоугля, получаемых из отходов агропромышленного комплекса. Внедрение биогазовых установций замкнутого цикла позволит решить проблему утилизации органических отходов животноводства и одновременно обеспечить энергетические потребности. Модернизация мелиоративных систем через переход к точному земледелию и капельному орошению обеспечит рациональное водопользование.

Для Приазовской зоны с характерными процессами засоления и подтопления предлагается внедрение адаптивных агролесоводческих систем на основе галофитных культур, интегрированных с аквапоническими и гидропонными установками замкнутого цикла. Фиторемедиационные технологии с использованием специальных растений-мелиорантов позволят осуществлять биологическую очистку дренажных вод с последующим их использованием в орошении. Развитие рекреационного потенциала через создание экологических маршрутов в сочетании с восстановлением дельтовых экосистем составит основу устойчивого развития территории.

В центральной урбанизированной зоне (г. Краснодар) ключевым направлением является развитие системы городского агролесоводства, включая вертикальное озеленение и создание многофункциональных лесопарков. Необходима организация системы селективного сбора и переработки органических городских отходов в компосты для нужд городского озеленения. Создание образовательных экологических

кластеров и поддержка социального предпринимательства в сфере циркулярной экономики позволят сформировать новую модель устойчивого городского развития.

Реализация предложенных мероприятий требует разработки интегральной системы мониторинга, адаптации нормативно-правовой базы и внедрения экономических стимулов для участников процесса перехода к циркулярной модели агролесоводства.

Заключение

Проведенное исследование доказывает, что переход к циркулярной модели агролесоводства является стратегически важным и перспективным направлением для устойчивого развития Краснодарского края. Этот подход представляет собой комплексное решение, позволяющее одновременно достичь экологической стабильности, экономической эффективности и социального благополучия.

Было установлено, что циркулярное агролесоводство, основанное на принципах замкнутого цикла и многофункционального использования ресурсов, коренным образом отличается от традиционных методов. Оно не только способствует повышению продуктивности сельскохозяйственных земель, но и играет ключевую роль в восстановлении и сохранении экосистем: борьбе с эрозией почв, улучшении микроклимата, сохранении биоразнообразия и секвестрации углерода.

Разработанная в ходе исследования поэтапная схема перехода и зонирование территории края с учетом природно-климатических особенностей предоставляют практический инструментарий для внедрения данных принципов. Предложенные для каждой зоны циркулярные решения — от создания защитных лесополос в степной зоне до развития экотуризма в предгорьях — показывают высокий адаптивный потенциал модели.

Успешная реализация этого потенциала невозможна без консолидированных усилий. Для этого необходима целенаправленная государственная политика, включающая разработку нормативной базы, финансовые стимулы и образовательные программы, а также активное участие бизнеса и местных сообществ.

Таким образом, внедрение циркулярного агролесоводства способно преобразовать агропромышленный комплекс Краснодарского края, превратив его в передовую, устойчивую и конкурентоспособную модель, обеспечивающую долгосрочную продовольственную и экологическую безопасность региона.

Список литературы

1. A., Jhariya, M.K. (2023). Carbon Sequestration in Agroforestry and Horticulture Based Farming Systems: Mitigating Climate Change and Advancing Food and Nutrition Security. In: Ghosh, S., Kumari Panda, A., Jung, C., Singh Bisht, S. (eds) Emerging Solutions in Sustainable Food and Nutrition Security. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40908-0_7
2. European Court of Auditors. (2023). Special Report: EU Funding for Agroforestry – Impact on Climate Change Mitigation and Adaptation Remains Largely Unknown. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
3. Santiago-Freijanes, J. J., Pisanelli, A., Rois-Díaz, M., Aldrey-Vázquez, J. A., Rigueiro-Rodríguez, A., Pantera, A., Vityi, A., Lojka, B., Ferreiro-Domínguez, N., & Mosquera-Losada, M. R. (2018). Agroforestry development in Europe: Policy issues. Land Use Policy, 72, 1-10.
4. Kay, S., Kühn, E., Albrecht, M. et al. Agroforestry can enhance foraging and nesting resources for pollinators with focus on solitary bees at the landscape scale. Agroforest Syst 94, 379–387 (2020). https://doi.org/10.1007/s10457-019-00400-9
5. Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., & Birkie, S. E. (2018). Circular economy as an essentially contested concept. *Journal of Cleaner Production*, *175*, 544-552. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111
6. Awazi, N. P. (2022). Agroforestry for Climate Change Adaptation, Resilience Enhancement and Vulnerability Attenuation in Smallholder Farming Systems in Cameroon. Journal of Atmospheric Science Research, 5(1). https://doi.org/10.30564/jasr.v5i1.4303

7. Nair, P. K. R., et al. (2021). Agroforestry: A decade of progress. *Advances in Agroforestry*, 14, 1-25.
8. Rahman, M. H., Ahrends, H. E., Raza, A., & Gaiser, T. (2023). Current approaches for modeling ecosystem services and biodiversity in agroforestry systems: Challenges and ways forward. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 1032442. https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1032442
9. Solar, R. R., et al. (2022). Biodiversity outcomes in agroforestry systems: A global synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 325, 107750.
10. Torralba, M., et al. (2024). Resilience of agroforestry systems to climate extremes: A meta-analysis. Science of The Total Environment, 908, 168232.
11. Keprate, A. *et al.* (2024). Climate Resilient Agroforestry Systems for Sustainable Land Use and Livelihood. In: Kanga, S., Singh, S.K., Shevkani, K., Pathak, V., Sajan, B. (eds) Transforming Agricultural Management for a Sustainable Future. World Sustainability Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63430-7_7
12. Nair P. K. Ramachandran, Kumar B. Mohan, Nair Vimala D. An Introduction to Agroforestry Four Decades of Scientific Developments 2nd ed. Edition; Springer Cham, 2021. 687 p. – DOI 10.1007/978-3-030-75358-0
13. Dagar, J. & Gupta, S.R. & Dimobe, Kangbeni. Agroforestry from a Global Perspective: Recent Developments, Technological Advancements, and Emerging Research Trends, 2025. – DOI 10.1007/978-981-97-5004-7_1
14. Castle, S.E., Miller, D.C., Merten, N. et al. Evidence for the impacts of agroforestry on ecosystem services and human well-being in high-income countries: a systematic map. Environ Evid. 2022; 11 (10). – DOI 10.1186/s13750-022-00260-4
15. Trigkas M. Agroforestry: promoting a circular bioeconomy and innovation to tackle climate change. In book: Reviving Agroforestry landscapes in the era of climate change for people, nature and local economy. Publisher: European Network of Political Foundations. – EnoP, Green Institute Greece, 2023:228-235
16. den Herder, M., Moreno, G., Mosquera-Losada, R. M., Palma, J. H. N., Sidiropoulou, A., Freijanes, J. J. S., Crous-Duran, J., Paulo, J. A., Tomé, M., Pantera, A., Papanastasis, V. P., Mantzanas, K., Pachana, P., Papadopoulos, A., Plieninger, T., & Burgess, P. J. (2017). Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *241*, 121–132. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005
17. Raj K., Veeraragavan M., Baral K., Saikanth D. R. K., Singh V., Upadhyay L, and Raj S. Agroforestry and Its Potential for Sustainable Land Management and Climate Action: A Review. International Journal of Environment and Climate Change. 2023; 13(12):620-29. – DOI 10.9734/ijecc/2023/v13i123722.
18. Ntawuruhunga D., Ngowi E. E., Mangi H. O., Salanga R. J., Shikuku K. M. Climate-smart agroforestry systems and practices: A systematic review of what works, what doesn't work, and why. Forest Policy and Economics. 2023; 150: 102937. – DOI 10.1016/j.forpol.2023.102937
19. Santos M., Cajaiba R. L., Bastos R., Gonzalez D., Petrescu Bakiş A. L., Ferreira D., Leote P., Barreto Da Silva W., Cabral J. A., Gonçalves B., Mosquera Losada M. R. Why Do Agroforestry Systems Enhance Biodiversity? Evidence from Habitat Amount Hypothesis Predictions. Frontiers in Ecology and Evolution. 2022; 9. – DOI 10.3389/fevo.2021.630151
20. Кретинин, В. М. Агролесоводство / В. М. Кретинин. – Волгоград: Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, 2021. – 268 с. – ISBN 978-5-6044587-6-1.
21. Muravieva M.A., Nazarova O.G. Forest bioeconomy and sustainable forest management. Agro forestry. Экономика и предпринимательство. 2024; 9(170): 26-30. – DOI 10.34925/EIP.2024.170.9.001.
22. Noordwijk M.V., Duguma L., Dewi S., Leimona B., Catacutan D.C., Lusiana B., Öborn I., Hairiah K., Minang P.A. SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: reinventing agroforestry? Current Opinion in Environmental Sustainability. 2018; 34: 33-42. – DOI 10.1016/j.cosust.2018.09.003

23. Russo O., Ricardo. Agroforestry: An Approach for Sustainability and Climate Mitigation. Environmental Sciences. IntechOpen. 2023. – DOI 10.5772/intechopen.105406.
24. Rubio-Delgado J, Schnabel S, Lavado-Contador J.F., Schmutz U. Small woody features in agricultural areas: Agroforestry systems of overlooked significance in Europe. Agricultural Systems. 2024; 218: 103973. – DOI 10.1016/j.agsy.2024.103973
25. Arshad M.A., Rouf S., Abbas R.N., Shahbaz Z., Aleem K., Shahbaz H., Pervaiz R., Sarwar A., ur Rehman H. Navigating Synergies: A Comprehensive Review of Agroforestry System and Agronomy Crops. Haya Saudi J Life Sci, 2024; 9(4): 97-113.
26. Rahn E., Vaast P., Läderach P., Van Asten P., Jassogne L., Ghazoul J. Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. Ecological Modelling. 2018; 371: 76-89. – DOI 10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009
27. Elsheikh R., Shariff A. R. M., Amiri F., Ahmad N. B., Balasundram S. K., Saberioon M. M. Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): A decision and planning support tool for tropical and subtropical crops. Computers and Electronics in Agriculture. 2013; 93: 98-110. – DOI 10.1016/j.compag.2013.02.003
28. Torralba M., Fagerholm N., Herzog F., Moreno G., Plieninger T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2016; 230: 150-161. – DOI 10.1016/j.agee.2016.06.002
29. Барсукова Г.Н., Барвинко О.А., Калугин А.О. Динамика земельного фонда Российской Федерации и Краснодарского края по категориям земель, составу и площади сельскохозяйственных угодий // Московский экономический журнал. – 2025. – Т. 10, № 2. – С. 48-65. – DOI 10.55186/2413046X_2025_10_2_37.
30. Региональный доклад о состоянии и использовании земель в Краснодарском крае. – URL: https://rosreestr.gov.ru/open-service/statistika-i-analitika/5zemleustroystvo-i-poluchenie-svedeniy-iz-gosudarstvennogo-fonda-dannykh-poluchennykh-v-rezultate-zem/deyatelnost-upravleniya-v-obla23sti-/
31. Постановление от 31 октября 2018 г. № 698 «Об утверждении Лесного плана Краснодарского края на 2019-2028 годы». – URL: https://docs.cntd.ru/document/550252087?ysclid=mdtnbyrls7875175054

References

1. A., Jhariya M.K. Carbon Sequestration in Agroforestry and Horticulture Based Farming Systems: Mitigating Climate Change and Advancing Food and Nutrition Security. In: Ghosh S., Kumari Panda A., Jung C., Singh Bisht S., eds. Emerging Solutions in Sustainable Food and Nutrition Security. Singapore: Springer; 2023: 49-61. DOI: 10.1007/978-3-031-40908-0_7.
2. Awazi N.P. Agroforestry for Climate Change Adaptation, Resilience Enhancement and Vulnerability Attenuation in Smallholder Farming Systems in Cameroon. Journal of Atmospheric Science Research. 2022;5(1):1-15. DOI: 10.30564/jasr.v5i1.4303.
3. Barsukova G. N., Barvinko O. A., Kalugin A. O. Dinamika zemel'nogo fonda Rossiyskoy Federatsii i Krasnodarskogo kraya po kategoriyam zemel', sostavu i ploshchadi sel'skokhozyaystvennykh ugodiy [Dynamics of the land fund of the Russian Federation and Krasnodar Krai by land categories, composition and area of agricultural land]. Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal = Moscow Economic Journal. 2025;10(2):48-65. (In Russ.). DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_2_37.
4. Castle S.E., Miller D.C., Merten N. et al. Evidence for the impacts of agroforestry on ecosystem services and human well-being in high-income countries: a systematic map. Environmental Evidence. 2022;11(1):10. DOI: 10.1186/s13750-022-00260-4.
5. Dagar J.C., Gupta S.R., Dimobe K. Agroforestry from a Global Perspective: Recent Developments, Technological Advancements, and Emerging Research Trends. In: Dagar J.C., Gupta S.R., eds. Agroforestry for Sustainable Development. Singapore: Springer; 2025:1-25. DOI: 10.1007/978-981-97-5004-7_1.
6. den Herder M., Moreno G., Mosquera-Losada R.M. et al. Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2017;241:121-132. DOI: 10.1016/j.agee.2017.03.005.

7. Elsheikh R., Shariff A.R.M., Amiri F. et al. Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): A decision and planning support tool for tropical and subtropical crops. Computers and Electronics in Agriculture. 2013;93:98-110. DOI: 10.1016/j.compag.2013.02.003.
8. European Court of Auditors. Special Report: EU Funding for Agroforestry – Impact on Climate Change Mitigation and Adaptation Remains Largely Unknown. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2023.
9. Kay S., Kühn E., Albrecht M. et al. Agroforestry can enhance foraging and nesting resources for pollinators with focus on solitary bees at the landscape scale. Agroforestry Systems. 2020;94(2):379-387. DOI: 10.1007/s10457-019-00400-9.
10. Keprate A., Kanga S., Singh S.K. et al. Climate Resilient Agroforestry Systems for Sustainable Land Use and Livelihood. In: Kanga S., Singh S.K., Shevkani K. et al., eds. Transforming Agricultural Management for a Sustainable Future. Cham: Springer; 2024:89-104. DOI: 10.1007/978-3-031-63430-7_7.
11. Korhonen J., Nuur C., Feldmann A., Birkie S.E. Circular economy as an essentially contested concept. Journal of Cleaner Production. 2018;175:544-552. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.111.
12. Kretinin V. M. Agrolesovodstvo [Agroforestry]. Volgograd: Federal'nyy nauchnyy tsentr agroekologii, kompleksnykh melioratsiy i zashchitnogo lesorazvedeniya Rossiyskoy akademii nauk; 2021. 268 s. (In Russ.). ISBN 978-5-6044587-6-1.
13. Murav'eva M. A., Nazarova O. G. Lesnaya bioekonomika i ustoychivoe upravlenie lesami. Agro lesovodstvo [Forest bioeconomy and sustainable forest management. Agroforestry]. Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economics and Entrepreneurship. 2024;9(170):26-30. (In Russ.). DOI: 10.34925/EIP.2024.170.9.001.
14. Nair P.K.R., Kumar B.M., Nair V.D. Agroforestry: A decade of progress. Advances in Agroforestry. 2021;14:1-25.
15. Nair P.K.R., Kumar B.M., Nair V.D. An Introduction to Agroforestry: Four Decades of Scientific Developments. 2nd ed. Cham: Springer; 2021. 687 p. DOI: 10.1007/978-3-030-75358-0.
16. Noordwijk M.V., Duguma L., Dewi S. et al. SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: reinventing agroforestry? Current Opinion in Environmental Sustainability. 2018;34:33-42. DOI: 10.1016/j.cosust.2018.09.003.
17. Ntawuruhunga D., Ngowi E.E., Mangi H.O. et al. Climate-smart agroforestry systems and practices: A systematic review of what works, what doesn't work, and why. Forest Policy and Economics. 2023;150:102937. DOI: 10.1016/j.forpol.2023.102937.
18. Postanovlenie ot 31 oktyabrya 2018 g. № 698 «Ob utverzhdenii Lesnogo plana Krasnodarskogo kraya na 2019-2028 gody» [Decree of October 31, 2018 No. 698 "On approval of the Forest Plan of Krasnodar Krai for 2019-2028"]. Pravitel'stvo Krasnodarskogo kraya; 2018. (In Russ.). URL: https://docs.cntd.ru/document/550252087?ysclid=mdtnbyrls7875175054
19. Rahn E., Vaast P., Läderach P. et al. Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. Ecological Modelling. 2018;371:76-89. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009.
20. Rahman M.H., Ahrends H.E., Raza A., Gaiser T. Current approaches for modeling ecosystem services and biodiversity in agroforestry systems: Challenges and ways forward. Frontiers in Forests and Global Change. 2023;5:1032442. DOI: 10.3389/ffgc.2022.1032442.
21. Raj K., Veeraragavan M., Baral K. et al. Agroforestry and Its Potential for Sustainable Land Management and Climate Action: A Review. International Journal of Environment and Climate Change. 2023;13(12):620-629. DOI: 10.9734/ijecc/2023/v13i123722.
22. Regional'nyy doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Krasnodarskom krae [Regional report on the status and use of lands in Krasnodar Krai]. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy registratsii, kadastra i kartografii; 2023. (In Russ.). URL: https://rosreestr.gov.ru/open-service/statistika-i-analitika/5zemleustroystvo-i-poluchenie-svedeniy-iz-gosudarstvennogo-fonda-dannykh-poluchennykh-v-rezultate-zem/deyatelnost-upravleniya-v-obla23sti-/

23. Rubio-Delgado J., Schnabel S., Lavado-Contador J.F., Schmutz U. Small woody features in agricultural areas: Agroforestry systems of overlooked significance in Europe. Agricultural Systems. 2024;218:103973. DOI: 10.1016/j.agsy.2024.103973.
24. Russo R.R. Agroforestry: An Approach for Sustainability and Climate Mitigation. Environmental Sciences. London: IntechOpen; 2023. DOI: 10.5772/intechopen.105406.
25. Santos M., Cajaiba R.L., Bastos R. et al. Why Do Agroforestry Systems Enhance Biodiversity? Evidence from Habitat Amount Hypothesis Predictions. Frontiers in Ecology and Evolution. 2022;9:630151. DOI: 10.3389/fevo.2021.630151.
26. Santiago-Freijanes J.J., Pisanelli A., Rois-Díaz M., Aldrey-Vázquez J.A., Rigueiro-Rodríguez A., Pantera A., Vityi A., Lojka B., Ferreiro-Domínguez N., Mosquera-Losada M.R. Agroforestry development in Europe: Policy issues. Land Use Policy. 2018;72:1-10. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.01.001.
27. Solar R.R., Barlow J., Ferreira J. et al. Biodiversity outcomes in agroforestry systems: A global synthesis. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2022;325:107750. DOI: 10.1016/j.agee.2021.107750.
28. Torralba M., Fagerholm N., Burgess P.J. et al. Resilience of agroforestry systems to climate extremes: A meta-analysis. Science of The Total Environment. 2024;908:168232. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168232.
29. Torralba M., Fagerholm N., Herzog F. et al. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2016;230:150-161. DOI: 10.1016/j.agee.2016.06.002.
30. Trigkas M. Agroforestry: promoting a circular bioeconomy and innovation to tackle climate change. In: Reviving Agroforestry landscapes in the era of climate change for people, nature and local economy. Athens: European Network of Political Foundations; 2023:228-235.
31. Arshad M.A., Rouf S., Abbas R.N. et al. Navigating Synergies: A Comprehensive Review of Agroforestry System and Agronomy Crops. Haya: Saudi Journal of Life Sciences. 2024;9(4):97-113.

Сведения об авторах

Терёшина Мария Валентиновна – доктор экономических наук, профессор кафедры государственной политики и публичного управления, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8982-5831, e-mail: mwstepanova@mail.ru

Яковлева Елена Александровна – доктор экономических наук, заведующий кафедрой мировой и национальной экономики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9697-8024, e-mail: elena-12-27@mail.ru

✉ *Яковенко Наталия Владимировна* – доктор географических наук, главный научный сотрудник НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/0000 0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com

Information about the authors

Maria V. Tereshina – Doctor of Economics, Professor of the Department of Public Policy and Public Administration, Kuban State University, 149, Stavropolskaya Str., Krasnodar, 350040, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8982-5831, e-mail: mwstepanova@mail.ru

Elena A. Yakovleva – Doctor of Economics, Head of the Department of World and National Economics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9697-8024, e-mail: elena-12-27@mail.ru

Nataliya V. Yakovenko – Dr. Sci. (Geogr.), Chief research officer of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000 0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com

✉ – Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/29
УДК 630*181.5:631.879

Гранулированный доменный шлак стимулирует рост саженцев березы пушистой в условиях закисленного почвенного субстрата

Ольга В. Захарова[1,2]✉, olgazakharova1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8590-2529
Ольга А. Федорова[3], fed-olga78@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-7581-6141
Григорий В. Григорьев[1], bboykick@outlook.com https://orcid.org/0000-0003-1236-3960
Александр А. Гусев[1,2], nanosecurity@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8699-9112

[1] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, Тамбов, 392036, Российская Федерация*

[2] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

[3] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Проведено исследование влияния гранулированного доменного шлака на рост саженцев березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) в условиях модельных закисленных субстратов (pH 4.2–5.2). Показано, что внесение шлака, основными компонентами которого являются оксиды кальция, кремния, магния и алюминия, эффективно нейтрализует кислотность почвы. Раскисление субстрата до pH ~ 6.0 достоверно стимулировало ростовые показатели растений: в слабокислом субстрате (pH 5.2) высота саженцев увеличилась на 74%, а диаметр стволика в сильнокислом субстрате (pH 4.2) – на 38% по сравнению с контрольными растениями без шлака. Нормализация pH также способствовала повышению интенсивности фотосинтеза и содержания хлорофиллов до уровня контроля, одновременно снижая активность антиоксидантных ферментов, что свидетельствует о смягчении окислительного стресса. Результаты демонстрируют тройной экологический эффект: безопасная утилизация промышленного отхода, улучшение качества кислых лесных почв и стимуляция роста лесных культур, что вносит вклад в декарбонизацию металлургической отрасли.

Ключевые слова: *утилизация промышленных отходов, закисление почв, декарбонизация, гранулированный доменный шлак, береза пушистая*

Финансирование: Исследования проводились в рамках реализации государственного задания FEMG-2024-0018 "Физико-химические и биотехнологические подходы к переработке вторичных продуктов металлургии для декарбонизации отрасли".

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Захарова О.В. Гранулированный доменный шлак стимулирует рост саженцев березы пушистой в условиях закисленного почвенного субстрата / О.В. Захарова, О.А. Федорова, Г.В. Григорьев, А.А. Гусев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 493-508. – *Библиогр.: с. 504–507 (42 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/29.

Поступила 29.06.2025. ***Пересмотрена*** 29.10.2025. ***Принята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Granulated blast furnace slag stimulates the growth of downy birch seedlings in acidified soil conditions

Olga V. Zakharova[1,2] ✉, olgazakharova1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8590-2529
Olga A. Fedorova[3], fed-olga78@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-7581-6141
Grigory V. Grigoriev[1], bboykick@outlook.com https://orcid.org/0000-0003-1236-3960
Alexander A. Gusev[1,2], nanosecurity@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8699-9112

[1] *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State University named after G.R. Derzhavin", st. International, 33, Tambov, 392036, Russian Federation*

[2] *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National University of Science and Technology MISIS", Leninsky Prospekt, 4, building 1, Moscow, 119049, Russian Federation*

[3] *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov" Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

A study was conducted to investigate the effect of granulated blast furnace slag on the growth of downy birch (Betula pubescens Ehrh.) seedlings in model acidified substrates (pH 4.2–5.2). The addition of slag, whose main components are calcium, silicon, magnesium, and aluminum oxides, was shown to effectively neutralize soil acidity. Substrate deacidification to pH ~6.0 significantly stimulated plant growth: seedling height increased by 74% in a slightly acidic substrate (pH 5.2), and stem diameter by 38% in a strongly acidic substrate (pH 4.2), compared to control plants without slag. Normalizing pH also contributed to an increase in photosynthesis intensity and chlorophyll content to control levels, while simultaneously reducing the activity of antioxidant enzymes, indicating mitigation of oxidative stress. The results demonstrate a triple environmental benefit: safe disposal of industrial waste, improvement of the quality of acidic forest soils, and stimulation of forest plant growth, which contributes to the decarbonization of the metallurgical industry.

Keywords: *industrial waste disposal, soil acidification, decarbonization, granulated blast furnace slag, downy birch*

Funding: The research was conducted as part of the state contract FEMG-2024-0018 "Physicochemical and Biotechnological Approaches to Recycling Secondary Metallurgy Products for Industry Decarbonization."

Acknowledgments: The author thanks the reviewers for their contributions to the peer review of this article.

Conflict of interest: The author declares no conflicts of interest.

For citation: Zakharova O.V., Fedorova O.A., Grigoriev G.V., Gusev A.A. (2025). Granulated blast furnace slag stimulates the growth of downy birch seedlings in acidified soil conditions. Forestry Engineering journal, Vol. 15 No. 4 (60), pp. 493-508 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/29.

Received 29.06.2025. ***Revised*** 29.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

Черная металлургия является одной из базовых отраслей промышленности, а также одним из крупнейших источников твердых техногенных отходов и выбросов CO_2 - на долю сталелитейной промышленности приходится около 6-7% глобальных выбросов CO_2 [1]. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), прямые выбросы CO_2 составляют примерно 1.4 тонны CO_2 на тонну произведенной стали [2], а по данным

международной консалтинговой компании Mckinsey и Всемирной ассоциации производителей стали – 1.85 [3, 4].

Среди основных крупнотоннажных отходов черной металлургии можно выделить шлаки [5]. В настоящее время годовой объем производства металлургических шлаков во всем мире составляет около 600 миллионов тонн [6]. Шлак образуется в качестве побочного продукта при выплавке чугуна и стали, что приводит к значительной вариабельности их состава и физических свойств. Основными компонентами металлургического шлака как правило являются оксид кальция (CaO), диоксид кремния (SiO_2), оксид железа (Fe_2O_3), оксид алюминия (Al_2O_3) и оксид магния (MgO), а также незначительные количества MnO, P_2O_5 и TiO_2 [5].

На данный момент, основными сферами использования металлургических шлаков являются строительная промышленность [7-9], экология, прежде всего, в качестве сорбента тяжелых металлов [10-12] и сельское хозяйство [13-15]. Использование в сельском хозяйстве подразумевает применение шлаков как мелиорантов, удобрений и раскислителей закисленных почв. В 2011 году в Китае началась реализация первой программы по использованию сталеплавильных шлаков в качестве удобрений, финансируемой Taiyuan Iron and Steel Group и Harsco Corporation из США [16]. К примеру, показано, что полная замена коммерческих удобрений на сталеплавильный шлак позволила увеличить рост гороха [17]. В другом исследовании при культивировании ячменя на почвах содержавших шлак урожайность зерна повышалась на 21% [18]. Отмеченные эффекты могут быть связаны с присутствием важных микроэлементов в составе шлака, а также с улучшением качества почвы. Стоит отметить, что наиболее часто, металлургический шлак предлагается в качестве раскислителя почв сельхоз угодий [19-21].

При этом, подкисление лесных почв во всем мире, также стало серьезной экологической проблемой, а количество публикаций о глобальном подкислении лесных почв неуклонно растет [22]. Такие методы ведения лесного хозяйства, как сплошные рубки, являются одним из основных нарушений, приводящих к выносу питательных веществ из почвы. Выщелачивание, потеря основных катионов и их удаление при заготовке древесины приводят к подкислению почвы, что может замедлить регенерацию или восстановление лесов [23]. Подкисление лесной почвы может вызвать повышение токсичности Al^{3+} для растений и снижение плодородия почвы, что влияет на рост растений в лесной экосистеме, обилие почвенной фауны и разнообразие микроорганизмов [24]. В связи с вышесказанным, разработка методов раскисления почв лесных насаждений является актуальной задачей, а более широкое применение сталеплавильных шлаков принесло бы значительные выгоды как с экологической, так и с экономической точки зрения [25].

Поскольку оценка эффектов воздействия гранулированного доменного шлака на представители распространенных лесных пород в различных экологических условиях ранее не проводилась, в нашей работе исследовалось морфометрические, физиологические и биохимические аспекты влияния этого отхода на саженцы березы пушистой в условиях субстратов с различной кислотностью. При этом ставились задачи исследовать стресс-протекторные свойства шлака как мелиоранта-раскислителя, а также источника микроэлементов, обладающих стимулирующими свойствами.

Материалы и методы

В работе использовался гранулированный доменный шлак ПАО «Северсталь» (Череповец, Россия). Состав используемого доменного шлака был исследован методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре ARL 9900 (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария). Морфологию частиц шлака изучали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JCM-7000 NeoScope (JEOL, Япония).

В качестве объекта исследования использовали берёзу пушистую (*Betula pubescens* Ehrh.) гибрида 15-1. Селекционный объект

единого генетико-селекционного комплекса (ЕГСК) берёз расположен в Семилукском питомнике Воронежской области (Россия). Для проведения эксперимента использовали микрорастения размноженные в культуре in vitro (Рис. 1).

В качестве субстрата для культивирования использовали искусственный грунт согласно ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Для проведения опыта было выбрано три варианта кислотности субстрата, имитирующих почвы разной степени закисленности: pH солевой вытяжки ~ 4.2 – сильнокислая; 4.8 – среднекислая; 5.2 – слабокислая. В качестве контроля использовали субстрат с pH солевой вытяжки ~ 6. Во все закисленные грунты вносили гранулированный шлак до достижения нейтральной реакции (pH солевой вытяжки ~ 6).

Полученные модельные субстраты помещали в пластиковые контейнеры объемом 1 литр и высаживали по одному растению на контейнер. В каждом варианте культивировали по 15 растений. Исследование проводили в условиях теплицы.

Учетные показатели: высота от начала прироста и диаметр стволика (измерялся штангенциркулем у основания прироста). Измерения площади листа проводились при помощи лазерного переносного измерителя площади листа CI– 202 (США), длинна волны лазерного диода 670 нм, максимальная длинна измерения 360 мм, ширина 150 мм, скорость сканирования 127 мм/сек, точность проводимых измерений 0.01 см^2.



Рисунок 1. Экспериментальные растения: а) размножение in vitro растений березы пушистой; б) растения в теплице.

Figure 1. Experimental plants: a) in vitro propagation of downy birch plants; b) plants in a greenhouse.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

Для измерения скорости поглощения углекислого газа листом in vivo использовали портативную систему измерения газообмена SIRAS-4 (PP Systems, США), оборудованную специальной рабочей камерой, предназначенной для проведения экспериментов с использованием метода открытой системы.

Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли по методике Wellburn [26]. Около 100 мг листовой ткани растирали в фарфоровой ступке в пробирках на 5 мл, добавляли 1 мл 80% ацетона и инкубировали с перемешиванием 15 мин в темноте. После центрифугирования 5 мин при 13000 об./мин супернатант отбирали в новые пробирки с защитой от света. Экстракцию 80% ацетоном повторяли дважды, супернатанты объединяли и доводили до 3 мл. Оптическую плотность растворов измеряли на 663, 646 и 470 нм против 80% ацетона. Содержание пигментов рассчитывали по следующим формулам (1 - 3):

$$\text{Хлорофилл a} = 12{,}21 \times A(663) - 2{,}81 \times A(646) \quad (1)$$

$$\text{Хлорофилл } b = 20{,}13 \times A(646) - 5{,}03 \times A(663) \quad (2)$$

$$\text{Каротиноиды} = \frac{1000 \times A(470) - 3{,}27 \text{ хл.} A - 104 \text{ хл.} B}{198} \quad (3),$$

где

A (663, 646, 470) – поглощение при 663, 646, 470 нм.

Для измерения содержания пролина в листьях берёзы пушистой, готовили кислый нингидрин путем нагревания 1.25 г нингидрина в 30 мл ледяной уксусной кислоты и 20 мл 6 М фосфорной кислоты, с перемешиванием до растворения. Навеску материала 0.1 г (полностью развернутые листья) гомогенизировали в 1,5 мл 3% водного раствора сульфосалициловой кислоты, фильтровали через бумагу Whatman # 2. После чего 0.8 мл фильтрата смешивали с 0.8 мл кислого нингидрина и 0.8 мл ледяной уксусной кислоты. Реакция проходила в течение часа при 100°C после чего её останавливали на ледяной бане. Реакционную смесь экстрагировали 1,6 мл толуола, осторожно перемешивая пробирочной мешалкой 15-20 с. Верхний слой толуола с хромофором отделяли от водной фазы, нагревали до комнатной температуры и измеряли при длине волны 520 нм (толуол использовали в качестве контроля). Измерения проводили на спектрофотометре Multiskan Sky (Thermo Scientific, США). Концентрацию пролина определяли по стандартной кривой и рассчитывали в мкг пролина/г сырой массы [27].

Для определения активности ферментов, 0.1 г листовой ткани растирали с использованием ступки и пестика с 2 мл натрий-фосфатного буфера (pH 7.8), содержащего 1 мМ EDTA и 2% поливинилполипирролидон и центрифугировали при 15000 g 10 мин при 4°C. Для предотвращения снижения или потери активности образцы после центрифугирования помещали в твердотельный термостат при температуре 4°C. В супернатанте определяли активность ферментов спектрофотометрическим методом [28, 29] на приборе Multiskan Sky (Thermo Scientific, США).

Статистическая обработка данных проводилась с использованием теста одностороннего дисперсионного анализа (ANOVA). На графиках и в таблицах данные представлены в виде среднего ± стандартного отклонения, звездочками отмечены статистически значимые различия ($p < 0{,}05$).

Результаты

Характеризация шлака

Образец гранулированного доменного шлака состоял из частиц размером 0.5 – 5 мм (Рис. 2а), имеющих иррегулярную морфологию и пористую структуру (Рис. 2б).

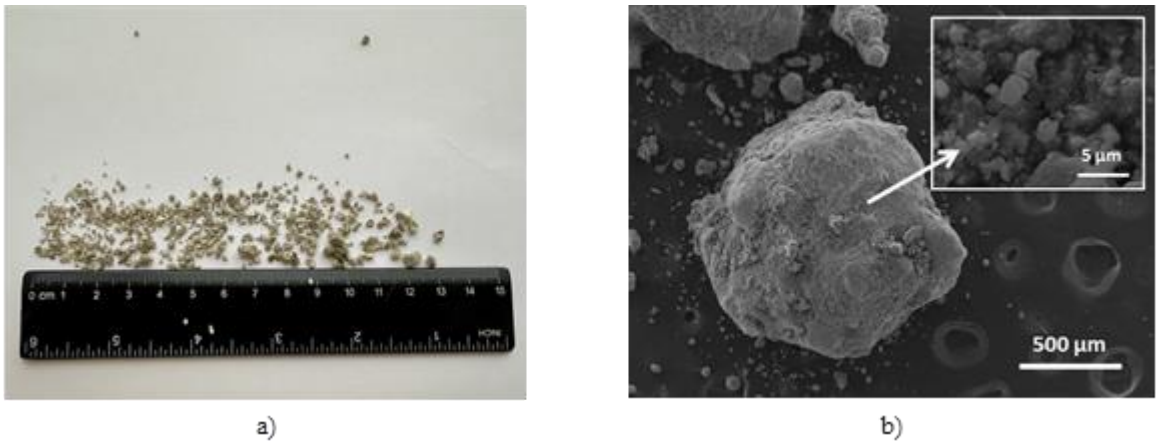


Рисунок 2. Образец шлака: а) внешний вид; б) электронные микрофотографии

Figure 2. Slag sample: a) general view; b) electron micrographs

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Рентгенофлуоресцентный анализ гранулированного доменного шлака показал (Табл. 1), что основными компонентами образца являются оксид кальция (45.4 %), диоксид кремния (32.3 %), оксид магния (12.3 %) и оксид алюминия (7.3 %). Остальные компоненты содержались в концентрации менее 1 %.

Таблица 1

Table 1

Состав образца шлака

Slag sample composition

Компонент / Component	aO	iO_2	gO	l_2O_3	a_2O	$_2O$	nO		e_2O_3	iO_2
Содержание, масс. % / Content, wt.%	5.4±3.4	2.3±3.7	2.3±2.3	.3± .7	.67±0.08	.53±0.05	.43±0.04	.31±0.02	.13±0.03	.06±0.01

Источник: собственные вычисления авторов/Source: own calculations

Таким образом, в работе использовался образец шлака, состоящий из пористых гранул размером 0.5 – 5 мм содержащих преимущественно оксиды кальция, кремния, магния и алюминия. В небольших количествах (менее 1 %) зафиксированы натрий, калий, марганец, сера, железо и титан.

Результаты оценки влияния шлака на березу пушистую.

Морфометрические параметры

Важной характеристикой качества посадочного материала, наряду с потенциалом роста корней, жизнеспособностью и др. является его морфометрические параметры. В связи с чем, перед закладкой опыта были измерены: высота растений, диаметр корневой шейки стволика, среднее количество листьев на одном растении и средняя площадь листовой пластины (Табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Морфометрические параметры побегов березы пушистой перед началом эксперимента

Morphometric parameters of downy birch shoots before the start of the experiment

Параметр / Parameter	**Значение / Value**
Высота растений, см / Plant height, cm	6.9±0.29 / 6.9±0.29
Диаметр корневой шейки стволика, мм / Root collar diameter, mm	1.4±0.08 / 1.4±0.08
Среднее количество листьев, шт / Average number of leaves, pcs.	5.6±0.37 / 5.6±0.37
Площадь листа, см² / Leaf area, cm²	3.1±0.18 / 3.1±0.18

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Через 60 дней после постановки эксперимента выявлено значительное преимущество в росте и развитии растений, высаженных в почвосмеси, содержащие гранулированный доменный шлак, по сравнению с растениями, высаженными в субстрат без дополнения шлака (Рис. 3). Как видно из представленных данных (Рис. 3а), максимальные значения ростовых параметров наблюдались в субстрате с pH 5.2, содержащим гранулированный шлак (26.1±2.1 см). При этом, самая низкая ростовая активность зафиксирована у растений

берёзы в варианте с pH 4.2 (15.0±2.1 см). В целом, при сравнении контрольных и опытных вариантов с одинаковым pH можно отметить, что добавление шлака повлияло на увеличение ростовых показателей берёзы, по-видимому, за счёт снижения кислотности в субстрате и дополнительного обеспечения корней макро- и микроэлементами.

Одновременно с измерением параметров высоты проводили замеры диаметра стволика берёзы пушистой у контрольных и опытных растений (Рис. 3б). Результаты показали отсутствие достоверного влияния кислотности грунта на анализируемый показатель. Исключением стали растения, культивируемые в субстрате с максимальной кислотностью (pH 4.2), где показатель составил 1.4±0.3 против 2.6±0.4 в контроле (pH 6.0). Добавление шлака увеличило диаметр стволика на 38% у растений, культивируемых в сильнокислом субстрате и на 20 % в слабокислом.

В течение экспериментального периода наблюдалось увеличение количества листьев в среднем с 5.6±0.37 шт. в начале опыта до 14.5±0.82 шт. в конце. Диапазон изменчивости количества листьев у опытных и контрольных растений всех вариантов эксперимента существенно не изменялся (Рис. 3в). Также не выявлено существенных различий при сравнении контрольных и опытных растений у каждого из изученных pH почвосмесей (в рамках одной кислотности). Закисление субстрата достоверно не влияло на площадь листовой пластины (Рис. 3г). Внесение шлака во всех случаях увеличивало показатель, максимальные значения средней площади листа отмечены при добавлении шлака в слабокислый субстрат – показатель был больше в 1.4 раза.

Показатели активности фотосинтетической системы

Сравнительный анализ параметров фотосинтетической активности листа берёзы пушистой на заключительной стадии культивирования показал, что фотосинтетическая активность растений у всех вариантов опыта без шлака плавно возрастала в ряду кислотности субстрата от pH 4.2 до pH 6.0 (Рис. 4а).

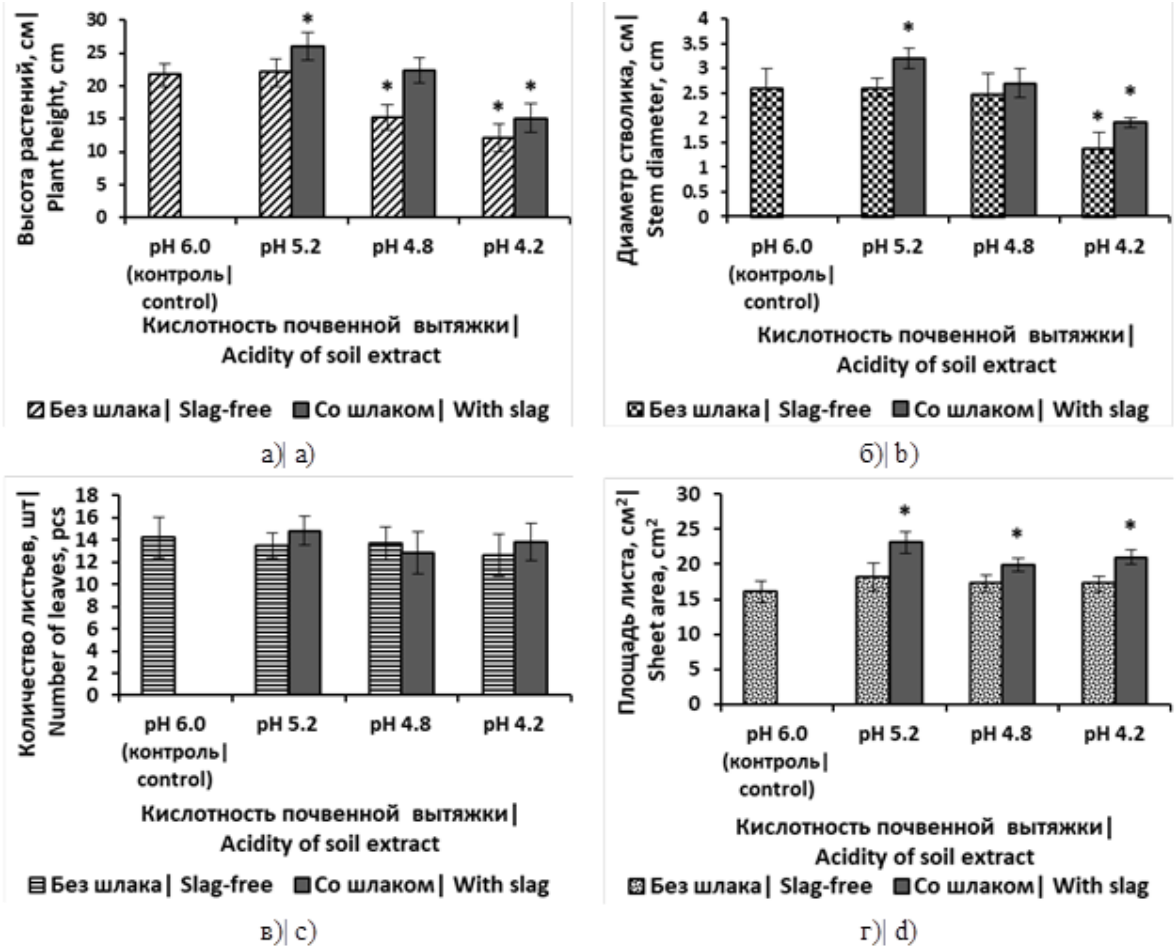


Рисунок 3. Морфометрические параметры побегов березы: а) высота растений; б) диаметра стволика; в) количество листьев на одном растении; г) средняя площадь листа.

Figure 3. Morphometric parameters of birch shoots: a) plant height; b) stem diameter; c) number of leaves per plant; d) average leaf area

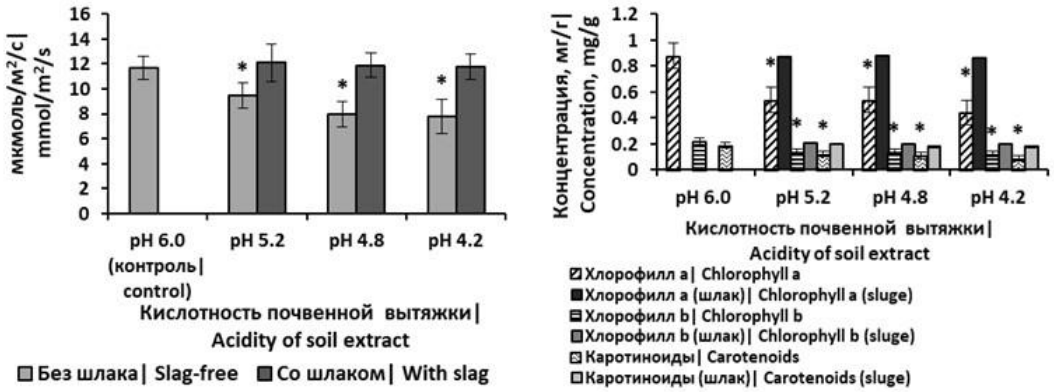
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Абсолютные значения интенсивности поглощения углекислоты растениями в варианте с сильнокислым почвогрунтом достигали 7.8±1.35 мкмоль/м^2/с. Постепенное увеличение изучаемого параметра наблюдалось последовательно в вариантах со среднекислым и слабокислым субстратом – 8.0±1.01 и 9.5±1.03 мкмоль/м^2/с соответственно. Для растений контрольной группы (pH 6.0) показатель был на уровне 11.7±0.93 мкмоль/м^2/с. Внесение шлака активировало фотосинтетическую систему во всех вариантах кислотности и доводило показатели до уровня контроля. Анализ содержания пигментов показал дозозависимое снижение концентрации хлорофиллов а, б и каротиноидов при повышении кислотности субстрата (Рис. 4б). При этом, как и в случае с ассимиляцией CO_2, раскиление субстрата шлаком повышало содержание фотосинтетических пигментов до уровня концентраций в контрольной группе.

Активность антиоксидантной системы

Эффективное функционирование антиоксидантной защитной системы находится в основе адаптации растений к неблагоприятным условиям. В связи с чем, нами была оценена активность антиоксидантной системы березы пушистой при повышении кислотности субстрата, а также при повышении pH почвенной вытяжки путем внесения гранулированного доменного шлака. Результаты показали повышение активности супероксиддисмутазы при повышении кислотности субстрата (Рис. 5а), минимальные значения (58 ед./мг) отмечены при pH 6.0, максимальные (298.4 ед./мг) при pH 4.2. Внесение

в грунт доменного шлака снижало активность фермента, однако показатели в группах, культивируемых в среднекислом и сильнокислом субстратах, все же превышали контрольные.

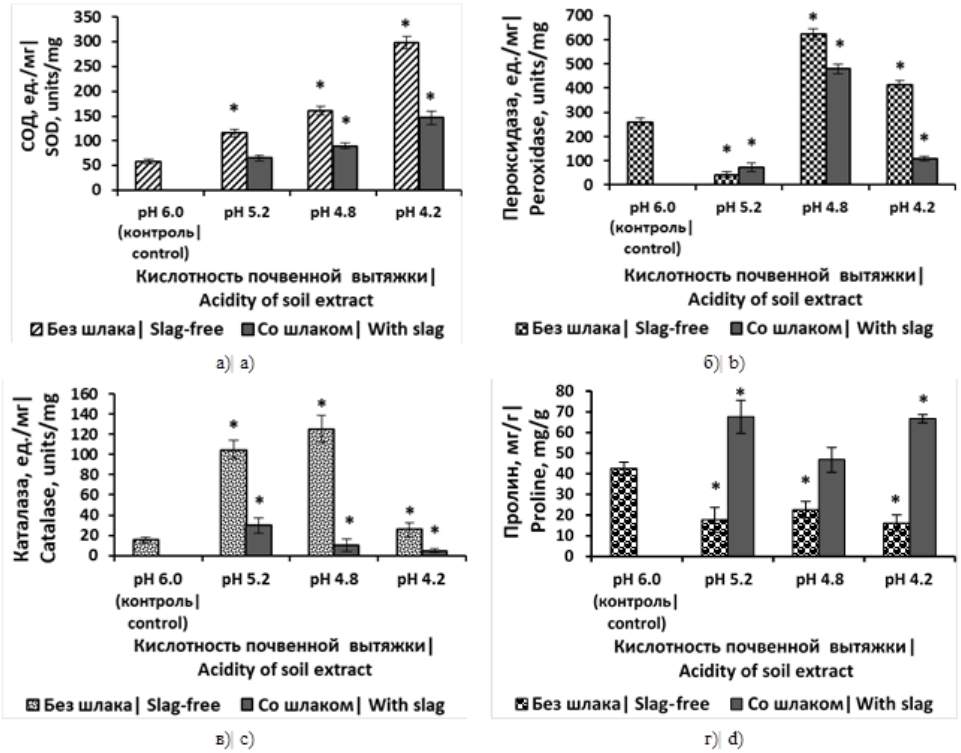


а)| a) б)| b)

Рисунок 4. Показатели активности фотосинтетической системы: а) интенсивность ассимиляции CO_2; б) содержание фотосинтетических пигментов

Figure 4. Photosynthetic system activity indicators: a) CO_2 assimilation rate; b) photosynthetic pigment content.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition



а)| a) б)| b) в)| c) г)| d)

Рисунок 5. Показатели активности антиоксидантной системы: а) супероксиддисмутаза; б) пероксидаза; в) каталаза; г) содержание пролина.

Figure 5. Antioxidant system activity indicators: a) superoxide dismutase; b) peroxidase; c) catalase; d) proline content.

Источник: собственная композиция авторов/Source: author's composition

Активность пероксидазы, отвечающей за нейтрализацию активных форм кислорода, имела минимальные значения у растений, культивируемых в субстрате с pH 5.2 (в варианте без шлака показатель был в 6 раз ниже, чем в контроле, при добавлении шлака – в 4 раза), а максимальные у растений из группы с pH 4.8 (Рис. 5б). Внесение шлака в субстрат несколько снижало активность фермента в группах с pH 4.8 и pH 4.2, тогда как при pH 5.2 наоборот – значения активности несколько повышались. В случае с каталазой также отмечена не линейная зависимость активности фермента от кислотности субстрата (Рис. 5в). Однако для каталазы, минимальная активность зафиксирована в контроле и в сильнокислом грунте, при этом максимум также отмечен при pH 4.8. При раскислении субстрата, активность фермента имела линейную зависимость от кислотности вытяжки, наибольшие показатели были при pH 5.2 (в 2 раза выше контрольных), наименьшие при pH 4.2 (в 3 раза ниже контрольных).

Содержание пролина в листьях березы уменьшалось при уменьшении pH вытяжки ниже 6.0 (Рис. 5г). Добавление шлака повышало показатели, однако, если в вариантах с pH 5.2 и pH 4.2 уровень содержания пролина был выше контрольных значений (в 1.6 раза), то при pH 4.8 содержание пролина вросло только до контрольного уровня.

Таким образом, проведенное исследование показало, что гранулированный доменный шлак может эффективно раскислять закисленные почвы и, благодаря этому, способствовать нормальному росту древесных растений.

Обсуждение

Полученные нами результаты показывают перспективность использования доменного шлака в качестве раскислителя почв лесных насаждений. Как видно из приведенных данных, закисление субстрата негативно влияло на развитие саженцев березы. Известно, что уменьшение pH почвы снижает доступность питательных веществ (фосфора, калия, кальция и магния), влияет на структуру и функционирование микробных сообществ и повышает доступность токсичных тяжелых металлов и других вредных элементов, особенно при уровнях pH ниже 4,5 [30, 31]. При этом внесение доменного шлака способствовало увеличению морфометрических параметров растений, а также интенсивности фотосинтеза. Полученные эффекты могут быть связаны, прежде всего, с повышением pH субстрата, а также содержащимися в составе шлака элементами. Например магний, участвует в синтезе хлорофилла, производстве, транспортировке и использовании фотоассимилятов, активации ферментов и синтезе белка [32]. Кремний, способствует повышению устойчивости к экологическим стрессам, таким как засуха, дефицит питательных веществ и болезни [33, 34]. Имеются данные, что кремний повышает жесткость клеточных стенок за счет биокремнификации, что очень полезно для роста растений и смягчает негативное воздействие биотических и абиотических стрессовых факторов [35, 36]. Кроме того, в составе шлака содержатся такие важные микроэлементы как железо и марганец, в первую очередь участвующие в фотосинтезе и производстве хлорофилла [37, 38].

Разными авторами было показано, что внесение шлака помогает повысить pH и доступность питательных веществ в почве, что способствует росту сельскохозяйственных культур и повышению урожайности [39]. Например, при добавлении сталеплавильного шлака в бедный питательными веществами субстрат позволило улучшить минеральный состава почвы, а также увеличить фотосинтетическую активность и рост биомассы кукурузы [40]. Другими авторами также показан прирост сухой массы кукурузы при добавлении шлака в почвы с различной кислотностью. При этом установлено, что внесение 1 и 2% шлака в почвы с pH 4,1 и 6,7 увеличивало поглощение P и Mn, однако, поглощение Fe и K усиливалось только при pH 6,7, в то время как поглощение K снижалось только в почве с pH 4,1 [41]. Шлаковые удобрения на основе кремнезема, внесенные в почву с дефицитом кремния, улучшили рост и урожайность риса, а также устойчивость растений

к бурым пятнам [42]. Добавление 3% и 5% измельченного гранулированного доменного шлака к илисто-гравийному песку, загрязненному 1,5 мг/кг Cd, увеличивало индекс площади листьев *Pinellia ternata* на 29% и 30%, а индекс площади корней на 65% и 66%, соответственно, по сравнению с контролем [43].

Таким образом, полученные нами данные хорошо соотносятся с мировым опытом применения шлаков в сельском хозяйстве, в частности с исследованиями на кукурузе и рисе, где также отмечалось повышение pH почвы и продуктивности биомассы. Однако наша работа вносит принципиально новый вклад, демонстрируя положительный эффект на древесной культуре в контексте лесовосстановления и предоставляя результаты комплексной физиолого-биохимической оценки стрессоустойчивости растений.

Заключение

Настоящее исследование убедительно подтвердило выдвинутое предположение о том, что гранулированный доменный шлак может служить не просто эффективным раскислителем, а активным стимулятором ростовых и физиологических процессов у саженцев березы пушистой в условиях кислотного стресса. Экспериментально установлено, что положительный эффект обусловлен комплексным воздействием, связанным с устранением избыточной кислотности, а также улучшением минерального питания растений за счет микроэлементов, высвобождаемых из шлака.

Ключевым количественным результатом стало значительное улучшение исследованных основных параметров роста. В слабокислом субстрате с добавкой шлака высота саженцев увеличилась на 74%, достигнув 26.1±2.1 см против 15.0±2.1 см в контрольной группе с кислым субстратом. Особенно показательным стало увеличение диаметра стволика на 38% в сильнокислой среде, что демонстрирует устранение главного сдерживающего фактора роста. Физиологическая оценка подтвердила полное восстановление функциональности фотосинтетического аппарата – интенсивность ассимиляции CO_2 и содержание хлорофиллов у обработанных шлаком растений достигали показателей интактного контроля. Важным свидетельством снятия окислительного стресса стало достоверное снижение активности антиоксидантных ферментов, что указывает на компенсацию токсического воздействия ионов алюминия и марганца в кислых почвах.

Перспективы дальнейших исследований определяются выявленными «белыми пятнами». Критически необходимы долгосрочные полевые эксперименты в условиях лесных питомников для оценки устойчивости эффекта в естественных условиях. Требуется изучение влияния различных доз и гранулометрического состава шлака на эффективность его действия. Особого внимания заслуживает мониторинг потенциального накопления тяжелых металлов в почве и тканях растений для полной оценки экологической безопасности. Кроме того, остается открытым вопрос о влиянии внесения шлака на структуру и функцию микробных сообществ кислых лесных почв как ключевого фактора благополучия экосистемы.

Таким образом, данная работа не только подтверждает высокую эффективность гранулированного доменного шлака как мелиоранта для лесного хозяйства, но и четко определяет границы применимости полученных знаний, формируя направления для будущих научных и прикладных изысканий в области устойчивого развития и циркулярной экономики.

Список литературы

1. Abdelbasir S.M., Abdel Khalek M.A. From Waste to Waste: Iron Blast Furnace Slag for Heavy Metal Ions Removal from Aqueous System. Environmental Science and Pollution Research. 2022; 29(38): 57964–57979. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-19834-3
2. Alejandro S., Höller S., Meier B., Peiter E. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. Frontiers in Plant Science. 2020; 11: 300. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300
3. Ali M.T., Shahram S. Converter Slag as a Liming Agent in the Amelioration of Acidic Soils. International Journal of Agriculture & Biology. 2007; 9(5). URL: https://www.researchgate.net/publication/228663048
4. Baalamurugan J., Ganesh Kumar V., Padmapriya R., Bupesh Raja V.K. Recent Applications of Steel Slag in Construction Industry. Environment, Development and Sustainability. 2024; 26(2): 2865–2896. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-022-02894-3
5. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. Plant and Soil. 1973; 39(1): 205–207. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00018060
6. Beauchamp C., Fridovich I. Superoxide Dismutase: Improved Assays and an Assay Applicable to Acrylamide Gels. Analytical Biochemistry. 1971; 44(1): 276–287. DOI: https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8
7. Deus A., Bertani R., Meirelles G., etc. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. 2018. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.81440
8. Díaz-Piloneta M., Ortega-Fernández F., Terrados-Cristos M., Álvarez-Cabal J.V. Application of Steel Slag for Degraded Land Remediation. Land. 2022; 11(2): 224. DOI: https://doi.org/10.3390/land11020224
9. Fu S., Kwon E.E., Lee J. Upcycling Steel Slag into Construction Materials. Construction and Building Materials. 2024; 444: 137882. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137882
10. Fujii K., Funakawa S., Kosaki T. Effects of Forest Management on Soil Acidification in Cedar Plantation. Geoderma. 2022; 424: 115967. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115967
11. Gao W., Zhou W., Lyu X., etc. Comprehensive Utilization of Steel Slag: A Review. Powder Technology. 2023; 422: 118449. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118449
12. Ghanta I., Biswas C., Basu P. Application of Bof Steelmaking Slag as a Partial Replacement of Agricultural Fertilizer. Journal of The Institution of Engineers (India). 2024; 105(3): 1527–1536. DOI: https://doi.org/10.1007/s40033-023-00560-0
13. Ghisman V., Muresan A.C., Buruiana D.L., Axente E.R. Waste Slag Benefits for Correction of Soil Acidity. Scientific Reports. 2022; 12(1): 16042. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-20528-6
14. Goswami V., Sharma D., Sharma P., Kothamasi D. Recycling Steel Slag as Fertiliser Proxy in Agriculture Is Good Circular Economy but Disrupts Plant Microbial Symbioses in the Soil. Science of The Total Environment. 2024; 954: 176750. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176750
15. Hao T., Zhu Q., Zeng M., etc. Impacts of Nitrogen Fertilizer Type and Application Rate on Soil Acidification Rate under a Wheat-Maize Double Cropping System. Journal of Environmental Management. 2020; 270: 110888. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888
16. Hoffmann C., Hoey M.V., Zeumer B. Steel Players across the Globe, and Especially in Europe, Are Increasingly Facing a Decarbonization Challenge. McKinsey & Company. URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel
17. IEA. Iron and Steel Technology Roadmap. URL: https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap
18. Ishfaq M., Wang Y., Yan M., etc. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. Frontiers in Plant Science. 2022; 13. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.802274
19. Ji R., Liu T.-J., Kang L.-L., etc. A Review of Metallurgical Slag for Efficient Wastewater Treatment: Pretreatment, Performance and Mechanism. Journal of Cleaner Production. 2022; 380: 135076. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135076
20. Khan A.L. Silicon: A Valuable Soil Element for Improving Plant Growth and Co2 Sequestration. Journal of Advanced Research. 2025; 71: 43–54. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027
21. Kumari S., Usha K., Gupta C.K., Singh B. Steel Slag Utilization in Agriculture as an Amendment and Fertilizer: Addressing the Chromium Challenge for Sustainable Resource Recycling and Management of the Industry Waste. Toxicological & Environmental Chemistry. 2025; 107(6): 971–1009. DOI: https://doi.org/10.15832/ankutbd.1197239
22. Maehly A.C., Chance B. The Assay of Catalases and Peroxidases. In: Methods of Biochemical Analysis. 1954; P. 357–424. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14
23. Mombelli D., Dall'Osto G., Scolari S., etc. The Use of Secondary Metallurgy Slag as Soil Corrective in Agriculture: Approval of Their Application in Italy. Steel research international. 2025; 96(1): 2400310. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.202400310

24. Ng C.W.W., Chowdhury N., Wong J.T.F. Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag (Ggbs) on Hydrological Responses of Cd-Contaminated Soil Planted with a Herbal Medicinal Plant (Pinellia Ternata). Canadian Geotechnical Journal. 2020; 57(5): 673–682. DOI: https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0868
25. Ning D., Song A., Fan F., Li Z., Liang Y. Effects of Slag-Based Silicon Fertilizer on Rice Growth and Brown-Spot Resistance. PLoS One. 2014; 9(7): e102681. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102681
26. O'Connor J., Nguyen T.B.T., Honeyands T., etc. Production, Characterisation, Utilisation, and Beneficial Soil Application of Steel Slag: A Review. Journal of Hazardous Materials. 2021; 419: 126478. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478
27. Okeke E.S., Nweze E.J., Ezike T.C., etc. Silicon-Based Nanoparticles for Mitigating the Effect of Potentially Toxic Elements and Plant Stress in Agroecosystems: A Sustainable Pathway Towards Food Security. Science of The Total Environment. 2023; 898: 165446. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165446
28. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., etc. Exploring the Potential for Steel Slags Valorisation in an Industrial Symbiosis Perspective at Meso-Scale Level. Waste and Biomass Valorization. 2023; 14(10): 3355–3375. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-022-01940-5
29. Qifeng S., Guo M.-Z., Wang L., Ling T.-C. Use of Steel Slag as Sustainable Construction Materials: A Review of Accelerated Carbonation Treatment. Resources, Conservation and Recycling. 2021; 173: 105740. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105740
30. Radić S., Crnojević H., Sandev D., etc. Effect of Electric Arc Furnace Slag on Growth and Physiology of Maize (Zea Mays L.). Acta Biologica Hungarica. 2013; 64(4): 490–499. DOI: https://doi.org/10.1556/ABiol.64.2013.4.8
31. Repo E., Warchoł J.K., Westholm L.J., Sillanpää M. Steel Slag as a Low-Cost Sorbent for Metal Removal in the Presence of Chelating Agents. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015; 27: 115–125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.12.025
32. Rout G.R., Sahoo S. Role of Iron in Plant Growth and Metabolism. Reviews in Agricultural Science. 2015; 3: 1–24. DOI: https://doi.org/10.7831/ras.3.1
33. Sun X., Li Z., Wu L., etc. Root-Induced Soil Acidification and Cadmium Mobilization in the Rhizosphere of Sedum Plumbizincicola: Evidence from a High-Resolution Imaging Study. Plant and Soil. 2019; 436(1): 267–282. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w
34. Wang G.C. In: The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction. 2 - Ferrous Metal Production and Ferrous Slags. Woodhead Publishing. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/C2014-0-03995-0
35. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and B, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. Journal of Plant Physiology. 1994; 144(3): 307–313. DOI: https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2
36. World Steel Association. World Steel in Figures. 2024. URL: https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2024/#major-steel-producing-countries%3Cbr%3E2022-and-2023
37. Yi H., Xu G., Cheng H., etc. An Overview of Utilization of Steel Slag. Procedia Environmental Sciences. 2012; 16: 791–801. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108
38. Zakharova O.V., Baranchikov P.A., Chebotaryova S.P., etc. Metallurgical Waste for Sustainable Agriculture: Converter Slag and Blast-Furnace Sludge Increase Oat Yield in Acidic Soils. Agronomy. 2024; 14(11): 2642. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14112642
39. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of Silicon in Plant Stress Tolerance: Opportunities to Achieve a Sustainable Cropping System. Biotech. 2019; 9(3): 73. DOI: https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z
40. Zhang Y., Ying Y., Xing L., etc. Carbon Dioxide Reduction through Mineral Carbonation by Steel Slag. Journal of Environmental Sciences. 2025; 152: 664–684. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.06.016
41. Zhang Y., Zhou J., Chen H. Global Trajectories of Forest Soil Acidification: A Scientometric Synthesis of Drivers, Impacts and Sustainable Solutions. Forests. 2025; 16(5): 733. DOI: https://doi.org/10.3390/f16050733
42. Zhang Y., Zhou J., Ren H., Chen H. Characterization of Forest Soil Acidification in Wenzhou Daluoshan and Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve. Sustainability. 2024; 16(16): 7051. DOI: https://doi.org/10.3390/su16167051

References

1. Abdelbasir S.M., Abdel Khalek M.A. From Waste to Waste: Iron Blast Furnace Slag for Heavy Metal Ions Removal from Aqueous System. Environmental Science and Pollution Research. 2022; 29(38): 57964–57979. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-19834-3
2. Alejandro S., Höller S., Meier B., Peiter E. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. Frontiers in Plant Science. 2020; 11: 300. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300
3. Ali M.T., Shahram S. Converter Slag as a Liming Agent in the Amelioration of Acidic Soils. International Journal of Agriculture & Biology. 2007; 9(5). URL: https://www.researchgate.net/publication/228663048
4. Baalamurugan J., Ganesh Kumar V., Padmapriya R., Bupesh Raja V.K. Recent Applications of Steel Slag in Construction Industry. Environment, Development and Sustainability. 2024; 26(2): 2865–2896. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-022-02894-3
5. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. Plant and Soil. 1973; 39(1): 205–207. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00018060
6. Beauchamp C., Fridovich I. Superoxide Dismutase: Improved Assays and an Assay Applicable to Acrylamide Gels. Analytical Biochemistry. 1971; 44(1): 276–287. DOI: https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8
7. Deus A., Bertani R., Meirelles G., etc. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. 2018. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.81440
8. Díaz-Piloneta M., Ortega-Fernández F., Terrados-Cristos M., Álvarez-Cabal J.V. Application of Steel Slag for Degraded Land Remediation. Land. 2022; 11(2): 224. DOI: https://doi.org/10.3390/land11020224
9. Fu S., Kwon E.E., Lee J. Upcycling Steel Slag into Construction Materials. Construction and Building Materials. 2024; 444: 137882. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137882
10. Fujii K., Funakawa S., Kosaki T. Effects of Forest Management on Soil Acidification in Cedar Plantation. Geoderma. 2022; 424: 115967. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115967
11. Gao W., Zhou W., Lyu X., etc. Comprehensive Utilization of Steel Slag: A Review. Powder Technology. 2023; 422: 118449. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118449
12. Ghanta I., Biswas C., Basu P. Application of Bof Steelmaking Slag as a Partial Replacement of Agricultural Fertilizer. Journal of The Institution of Engineers (India). 2024; 105(3): 1527–1536. DOI: https://doi.org/10.1007/s40033-023-00560-0
13. Ghisman V., Muresan A.C., Buruiana D.L., Axente E.R. Waste Slag Benefits for Correction of Soil Acidity. Scientific Reports. 2022; 12(1): 16042. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-20528-6
14. Goswami V., Sharma D., Sharma P., Kothamasi D. Recycling Steel Slag as Fertiliser Proxy in Agriculture Is Good Circular Economy but Disrupts Plant Microbial Symbioses in the Soil. Science of The Total Environment. 2024; 954: 176750. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176750
15. Hao T., Zhu Q., Zeng M., etc. Impacts of Nitrogen Fertilizer Type and Application Rate on Soil Acidification Rate under a Wheat-Maize Double Cropping System. Journal of Environmental Management. 2020; 270: 110888. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888
16. Hoffmann C., Hoey M.V., Zeumer B. Steel Players across the Globe, and Especially in Europe, Are Increasingly Facing a Decarbonization Challenge. McKinsey & Company. URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel
17. IEA. Iron and Steel Technology Roadmap. URL: https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap
18. Ishfaq M., Wang Y., Yan M., etc. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. Frontiers in Plant Science. 2022; 13. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.802274
19. Ji R., Liu T.-J., Kang L.-L., etc. A Review of Metallurgical Slag for Efficient Wastewater Treatment: Pretreatment, Performance and Mechanism. Journal of Cleaner Production. 2022; 380: 135076. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135076
20. Khan A.L. Silicon: A Valuable Soil Element for Improving Plant Growth and Co2 Sequestration. Journal of Advanced Research. 2025; 71: 43–54. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027
21. Kumari S., Usha K., Gupta C.K., Singh B. Steel Slag Utilization in Agriculture as an Amendment and Fertilizer: Addressing the Chromium Challenge for Sustainable Resource Recycling and Management of the Industry Waste. Toxicological & Environmental Chemistry. 2025; 107(6): 971–1009. DOI: https://doi.org/10.15832/ankutbd.1197239
22. Maehly A.C., Chance B. The Assay of Catalases and Peroxidases. In: Methods of Biochemical Analysis. 1954; P. 357–424. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14
23. Mombelli D., Dall'Osto G., Scolari S., etc. The Use of Secondary Metallurgy Slag as Soil Corrective in Agriculture: Approval of Their Application in Italy. Steel research international. 2025; 96(1): 2400310. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.202400310

24. Ng C.W.W., Chowdhury N., Wong J.T.F. Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag (Ggbs) on Hydrological Responses of Cd-Contaminated Soil Planted with a Herbal Medicinal Plant (Pinellia Ternata). Canadian Geotechnical Journal. 2020; 57(5): 673–682. DOI: https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0868
25. Ning D., Song A., Fan F., Li Z., Liang Y. Effects of Slag-Based Silicon Fertilizer on Rice Growth and Brown-Spot Resistance. PLoS One. 2014; 9(7): e102681. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102681
26. O'Connor J., Nguyen T.B.T., Honeyands T., etc. Production, Characterisation, Utilisation, and Beneficial Soil Application of Steel Slag: A Review. Journal of Hazardous Materials. 2021; 419: 126478. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478
27. Okeke E.S., Nweze E.J., Ezike T.C., etc. Silicon-Based Nanoparticles for Mitigating the Effect of Potentially Toxic Elements and Plant Stress in Agroecosystems: A Sustainable Pathway Towards Food Security. Science of The Total Environment. 2023; 898: 165446. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165446
28. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., etc. Exploring the Potential for Steel Slags Valorisation in an Industrial Symbiosis Perspective at Meso-Scale Level. Waste and Biomass Valorization. 2023; 14(10): 3355–3375. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-022-01940-5
29. Qifeng S., Guo M.-Z., Wang L., Ling T.-C. Use of Steel Slag as Sustainable Construction Materials: A Review of Accelerated Carbonation Treatment. Resources, Conservation and Recycling. 2021; 173: 105740. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105740
30. Radić S., Crnojević H., Sandev D., etc. Effect of Electric Arc Furnace Slag on Growth and Physiology of Maize (Zea Mays L.). Acta Biologica Hungarica. 2013; 64(4): 490–499. DOI: https://doi.org/10.1556/ABiol.64.2013.4.8
31. Repo E., Warchoł J.K., Westholm L.J., Sillanpää M. Steel Slag as a Low-Cost Sorbent for Metal Removal in the Presence of Chelating Agents. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015; 27: 115–125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.12.025
32. Rout G.R., Sahoo S. Role of Iron in Plant Growth and Metabolism. Reviews in Agricultural Science. 2015; 3: 1–24. DOI: https://doi.org/10.7831/ras.3.1
33. Sun X., Li Z., Wu L., etc. Root-Induced Soil Acidification and Cadmium Mobilization in the Rhizosphere of Sedum Plumbizincicola: Evidence from a High-Resolution Imaging Study. Plant and Soil. 2019; 436(1): 267–282. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w
34. Wang G.C. In: The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction. 2 - Ferrous Metal Production and Ferrous Slags. Woodhead Publishing. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/C2014-0-03995-0
35. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and B, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. Journal of Plant Physiology. 1994; 144(3): 307–313. DOI: https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2
36. World Steel Association. World Steel in Figures. 2024. URL: https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2024/#major-steel-producing-countries%3Cbr%3E2022-and-2023
37. Yi H., Xu G., Cheng H., etc. An Overview of Utilization of Steel Slag. Procedia Environmental Sciences. 2012; 16: 791–801. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108
38. Zakharova O.V., Baranchikov P.A., Chebotaryova S.P., etc. Metallurgical Waste for Sustainable Agriculture: Converter Slag and Blast-Furnace Sludge Increase Oat Yield in Acidic Soils. Agronomy. 2024; 14(11): 2642. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14112642
39. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of Silicon in Plant Stress Tolerance: Opportunities to Achieve a Sustainable Cropping System. Biotech. 2019; 9(3): 73. DOI: https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z
40. Zhang Y., Ying Y., Xing L., etc. Carbon Dioxide Reduction through Mineral Carbonation by Steel Slag. Journal of Environmental Sciences. 2025; 152: 664–684. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.06.016
41. Zhang Y., Zhou J., Chen H. Global Trajectories of Forest Soil Acidification: A Scientometric Synthesis of Drivers, Impacts and Sustainable Solutions. Forests. 2025; 16(5): 733. DOI: https://doi.org/10.3390/f16050733
42. Zhang Y., Zhou J., Ren H., Chen H. Characterization of Forest Soil Acidification in Wenzhou Daluoshan and Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve. Sustainability. 2024; 16(16): 7051. DOI: https://doi.org/10.3390/su16167051

Сведения об авторах

✉ *Захарова Ольга Владимировна* – кандидат биологических наук, директор НОЦ Экологии и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8590-2529, e-mail: olgazakharova1@mail.ru.

Федорова Ольга Анатольевна – кандидат биологических наук, научный сотрудник Лаборатории анализа полимеразной цепной реакции, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7581-6141, e-mail: fed-olga78@mail.ru.

Григорьев Григорий Викторович – младший научный сотрудник НОЦ Экологии и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1236-3960, e-mail: bboykick@outlook.com.

Гусев Александр Анатольевич – доктор биологических наук, проректор по научной работе, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8699-9112, e-mail: nanosecurity@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Olga V. Zakharova* – PhD, Director of the Research and Education Center for Ecology and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya Street, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8590-2529, e-mail: olgazakharova1@mail.ru.

Olga A. Fedorova – PhD, Researcher of the Polymerase Chain Reaction Analysis Laboratory, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, 8 Timiryazeva Street, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7581-6141, e-mail: fed-olga78@mail.ru.

Grigory V. Grigoriev – Junior Researcher of the Research and Education Center for Ecology and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya Street, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1236-3960, e-mail: bboykick@outlook.com.

Alexander A. Gusev – Doctor of Sciences, Vice-Rector for Research, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya Street, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8699-9112, e-mail: nanosecurity@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья
DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/30
УДК 630*931+502.17

Экосистемные услуги лесов: системный анализ концепции, современной критики и подходов к оценке

Наталия В. Яковенко✉, n.v.yakovenko71@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4203-0040
Екатерина А. Старухина, katestarukhina15@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-9652-8629
Мануш Г. Варгузина, manushik017@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0001-6964-8564
Елизавета А. Нацентова, nacentovaea@vglta.vrn.ru, https://orcid.org/0009-0005-7500-0915
Ольга В. Волошина, oly.v78@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-6390-6518

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Лесные экосистемы являются критически важным компонентом глобального природного капитала, обеспечивая широкий спектр жизненно необходимых регуляторных, обеспечивающих и культурных благ. Однако доминирование узкоэкономического подхода, фокусирующегося на сырьевой ренте, приводит к системной недооценке истинной ценности лесов и их деградации. Концепция экосистемных услуг (ЭУ) стала ключевым инструментом для решения этой проблемы, но её широкое применение в научной и политической практике выявило ряд методологических противоречий и этических вызовов, требующих комплексного анализа. Цель исследования -провести системный анализ концепции экосистемных услуг лесов, включая её теоретические основания, существующие классификации, современную критику и методологический аппарат для экономической оценки, с фокусом на специфику российского научного дискурса и управленческой практики. В исследовании применен междисциплинарный подход, синтезирующий методы систематического обзора и контент-анализа научной литературы, нормативно-правовых актов и отчетных данных. Использованы методы сравнительного анализа для сопоставления классификационных систем (MEA, CICES, NCP) и методологий экономической оценки (методы рыночных цен, затратные методы, методы выявленных и выраженных предпочтений). Анализ российской специфики основан на данных мета-обзоров современных публикаций. Выявлены ключевые теоретические и практические ограничения концепции ЭУ: антропоцентричная редукция ценности природы; терминологическая путаница и концептуальный разрыв между парадигмами в российской науке; значительный разброс результатов экономических оценок; слабая операционализация результатов исследований в управленческие решения. Определены основные факторы, влияющие на вариативность оценок в РФ (выбор метода, социально-экономический контекст, характеристики леса). Систематизирован арсенал методов экономической оценки, их преимущества и ограничения. Перспективы развития связаны с преодолением узкого утилитаризма через интеграцию плюрализма ценностей (подход NCP), смещение фокуса на управление экосистемными функциями и разработку конкретных институциональных механизмов. К ним относятся добровольная лесная сертификация (FSC), подтверждающая положительное воздействие на ЭУ, и новые инструменты учета природного капитала (концепция «Единицы природы»), способные транслировать экологическую ценность в язык экономических и управленческих решений для перехода к устойчивой модели лесопользования.

Ключевые слова: *экосистемные услуги, лесные экосистемы, природный капитал, экономическая оценка, антропоцентризм, классификация CICES, устойчивое управление лесами, российские леса*

Финансирование: исследование не получало финансирования

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Яковенко Н.В., Старухина Е.А., Варгузина М.Г., Нацентова Е.А., Волошина О.В. Экосистемные услуги лесов: системный анализ концепции, современной критики и подходов к оценке // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 509–534. – *Библиогр.: с. 528–533 (41 назв.)*. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/30.

Поступила 20.09.2025. ***Пересмотрена*** 15.10.2025. П***ринята*** 30.11.2025. ***Опубликована онлайн*** 26.12.2025.

Article

Forest ecosystem services: a systematic analysis of the concept, contemporary criticism and assessment approaches

Natalia V. Yakovenko✉, n.v.yakovenko71@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4203-0040
Ekaterina A. Starukhina, katestarukhina15@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-9652-8629
Manush G. Varguzina, manushik017@mail.ru, https://orcid.org/ 0009-0001-6964-8564
Elizaveta A. Natsentova, nacentovaea@vglta.vrn.ru, https://orcid.org/0009-0005-7500-0915
Olga V. Voloshina, oly.v78@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-6390-6518

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev Str., Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Forest ecosystems are a critically important component of global natural capital, providing a wide range of vital regulatory, provisioning, and cultural benefits. However, the dominance of a narrowly economic approach focused on raw material rent leads to a systematic underestimation of the true worth of forests and their degradation. The concept of ecosystem services has become a key tool for addressing this issue, but its widespread application in scientific and political practice has revealed a number of methodological contradictions and ethical challenges that require integrated analysis. The aim of the research is to systematically analyze the concept of forest ecosystem services, including its theoretical foundations, existing classifications, modern critiques, and the methodological apparatus for economic evaluation, with a focus on the specifics of Russian scientific discourse and management practice. The interdisciplinary approach is applied in the research, which synthesized methods of systematic review and content analysis of scientific literature, regulatory legal acts, and reporting data. Comparative analysis methods were used to compare classification systems (MEA, CICES, NCP) and economic evaluation methodologies (market price methods, cost methods, methods of identified and expressed preferences). The analysis of Russian specifics is based on data from meta-reviews of contemporary publications. Key theoretical and practical limitations of the ecosystem services concept have been identified: anthropocentric reduction of nature's value; terminological confusion and conceptual gap between paradigms in Russian science; significant variability in economic valuation results; and weak operationalization of research results into management decisions. The main factors influencing the variability of assessments in the Russian Federation (method selection, socio-economic context, forest characteristics) have been identified. The arsenal of economic valuation methods, their advantages and limitations,

has been systematized. Development prospects are linked to overcoming narrow utilitarianism through the integration of value pluralism (the NCP approach), shifting focus to managing ecosystem functions, and developing specific institutional mechanisms. These include voluntary forest certification (FSC), which confirms the positive impact on ecosystem services, and new natural capital accounting tools (the "Nature Units" concept), capable of translating environmental value into the language of economic and management decisions for transitioning to a sustainable forest management model.

Keywords: *ecosystem services, forest ecosystems, natural capital, economic valuation, anthropocentrism, CICES classification, sustainable forest management, Russian forests*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interests.

For citation: Yakovenko N.V., Starukhina E.A., Gagikovna V.M., Natsentova E.A., Voloshina O.V. Ecosystem services of forests: a systematic analysis of the concept, contemporary criticism and assessment approaches. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 509–534 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/30.

Received 20.09.2025. ***Revised*** 15.10.2025. ***Accepted*** 30.11.2025. ***Published online*** 26.12.2025.

Введение

В контексте глобальных антропогенных воздействий на биосферу, проявляющихся в изменении климата, утрате биоразнообразия и деградации природных систем, концептуализация взаимозависимости между благосостоянием социума и функционированием экосистем приобретает характер императива.

Центральной междисциплинарной парадигмой, нацеленной на интеграцию экологических ценностей в социально-экономический дискурс, выступила концепция экосистемных услуг (ЭУ) – потока разнообразных благ, извлекаемых человечеством из природных систем. Для лесных биомов, представляющих собой структурообразующие компоненты планетарного природного капитала, данный подход обладает эвристическим потенциалом, позволяя осуществить переход от редукционистского восприятия леса как источника древесного сырья к его пониманию как сложного социально-экологического комплекса, продуцирующего услуги климаторегуляции, водорегулирования, поддержания биоразнообразия и обеспечения культурного благополучия.

Операционализация теоретического конструкта «экосистемные услуги» (ЭУ) стала ключевым этапом, позволившим количественно и качественно оценивать каузальные связи между состоянием экосистем и параметрами человеческого благосостояния. Настоящий обзор ставит целью ретроспективный анализ генезиса данной концепции, критическое рассмотрение основных классификационных схем, а также идентификацию актуальных векторов научной дискуссии и прикладных исследований в данной области.

Концептуальный фундамент был заложен в период рубежа 1990-х – 2000-х годов. Фундаментальный труд Гретхен Дейли и её коллег «Nature’s Services» [1] представил исходную систематизацию и анализ природных благ. Одновременно, новаторская работа Costanza et al. (1997) в журнале Nature [2] впервые осуществила глобальную денежную оценку мировых экосистемных услуг и природного капитала, что стало **программной основой** для развития всего направления экологической экономики.

Институциональное оформление и стандартизация подхода были осуществлены благодаря масштабному проекту Millennium

Ecosystem Assessment (MEA, 2005) [3]. Данный проект предложил ставшую канонической четырёхуровневую классификацию, разделив все услуги на обеспечивающие, регулирующие, культурные и поддерживающие. Эта модель, в силу своей простоты и наглядности, долгое время была доминирующей в научных и политических кругах. Однако впоследствии она подверглась критике за методологическую проблему «двойного счета» (поддерживающие услуги косвенно учитывались в стоимости других) и излишний антропоцентризм.

В ответ на эти вызовы были разработаны альтернативные системы. Общая международная классификация экосистемных услуг (CICES), активно развиваемая с 2010-х годов (Haines-Young & Potschin, 2013) [4], исключила категорию поддерживающих услуг, заменив её детальным описанием экосистемных функций, и предложила иерархическую структуру, более пригодную для бухгалтерского учёта и экономической оценки. Параллельно Межправительственная научно-политическая платформа по биоразнообразию и экосистемным услугам (IPBES) выдвинула более инклюзивную концепцию «Вклада природы в благополучие людей» (Nature’s Contributions to People, NCP), которая стремится учесть плюрализм ценностей, включая знания коренных народов и локальные сообществ (Díaz et al., 2015; 2018) [5].

Следующим важным направлением исследований стала разработка методов количественной оценки и пространственного картирования ЭУ. В последнее десятилетие произошёл значительный прогресс в этой области благодаря развитию геоинформационных систем (ГИС) и методов дистанционного зондирования. Работы Burkhard et al. (2010, 2012) [6,7] заложили основу для картографирования потоков услуг с использованием матриц «экосистемные функции — услуги». Современные исследования, такие как мета-анализ Rau et al. (2018) [8], констатируют рост числа работ по оценке, однако критикуют преобладание статических «снимков» состояния и недостаток исследований, анализирующих временную динамику услуг, что ограничивает возможности прогнозирования.

Особое внимание уделяется изучению синергий и компромиссов (trade-offs) между разными услугами, что критически важно для планирования землепользования. Новаторское исследование Bennett et al. (2009) [9] показало, что управление, направленное на максимизацию одной услуги (например, производства продовольствия), часто ведёт к снижению других (например, качества воды или биоразнообразия).

Параллельно с развитием методологии шла активная критическая рефлексия самой концепции. Учёные указывают на её избыточный антропоцентризм и риск окончательной инструментализации природы, сводящей её ценность лишь к полезности для человека (Schröter et al., 2014; Silvertown, 2015) [10,11]. Другим направлением критики стала терминологическая путаница и смешение понятий «функция», «услуга» и «ценность», что затрудняет междисциплинарный диалог и сопоставимость исследований.

Практическим ответом на эту критику стало развитие механизмов интеграции концепции в реальную экономику и политику. Наиболее известным инструментом являются платежи за экосистемные услуги (PES), теоретические основы которых были заложены в работах Wunder (2005, 2015) [12,13]. В России интерес к прикладному применению концепции нарастает, о чём свидетельствуют первые национальные оценки (Букварёва, Замолодчиков, 2016) [14] и попытки разработки инструментов учёта природного капитала, таких как концепция «Единицы природы», инициированная в 2025 году.

Таким образом, эволюция концепции экосистемных услуг демонстрирует переход от первоначального этапа теоретизации и глобальной оценки (Daily, 1997; MEA, 2005) к этапу методологического усложнения, критического переосмысления и поиска путей практической интеграции. Современные исследования сосредоточены на разработке более точных инструментов пространственно-временной оценки (Burkhard et al., 2012; Rau et al., 2018), осмыслении этических и концептуальных ограничений (Schröter et al., 2014), а также на создании конкретных экономико-управленческих механизмов (Wunder,

2015), способных перевести ценность природы в плоскость конкретных решений.

Несмотря на широкое признание в научной литературе и международной политике, концепция ЭУ с момента своего появления стала объектом интенсивной критической рефлексии. Основные дискуссии разворачиваются вокруг её антропоцентричных оснований, ведущих к инструментализации природы и игнорированию её внутренней (интринсической) ценности. Второй комплекс проблем связан с методологической неоднородностью: терминологической путаницей в определении ключевых понятий («функция», «услуга», «ценность»), что особенно характерно для российского научного дискурса; сложностью операционализации и перевода результатов теоретических исследований, особенно в сфере культурных услуг, в плоскость практических управленческих решений; а также значительным разбросом результатов экономических оценок, затрудняющим их использование для обоснования политики. Актуальность данного исследования определяется необходимостью системного анализа этих противоречий, без которого концепция ЭУ рискует остаться абстрактным теоретическим конструктом, не способным эффективно влиять на практику природопользования.

Современные исследования экосистемных услуг переживают концептуальную эволюцию: от инвентаризации и стоимостной оценки к анализу их как динамических продуктов сложных социально-экологических систем. Ключевым стало понимание пространственных потоков услуг от мест их формирования к местам использования [Wang et al., 2022] [15]. Эти потоки напрямую определяются структурой ландшафта, где его композиция и конфигурация могут выступать либо коридорами, либо барьерами для перемещения благ [Assis et al., 2023] [16]. Параллельно сформировался взгляд на услуги через призму социально-экологических сетей, в которых они могут быть представлены как узлы, связи или новые свойства, возникающие из взаимодействий [Felipe-Lucia et al., 2022] [17]. Такой системный подход позволяет оценивать последствия крупных нарушений, таких как пожары, чье влияние на разные категории услуг, как показал глобальный синтез [Roces-Díaz et al., 2022] [18], крайне неоднородно.

Особую методологическую сложность представляет оценка культурных экосистемных услуг. Для их изучения применяются комплексные методики, комбинирующие традиционные опросы с анализом цифровых данных, например, из социальных сетей [Cheng et al., 2019] [19]. Технологии дистанционного зондирования открывают новые возможности для косвенной оценки этих услуг, особенно в городских экосистемах [Garcia-Pardo et al., 2022] [20]. Для интеграции разнородных данных и упрощения принятия решений разрабатываются агрегированные индикаторы, например, Комплексный индекс экосистемных услуг [Wu & Fan, 2022] [21].

Конечной целью многих работ является внедрение научных знаний в практику управления. Это требует разработки многоуровневых концептуальных рамок, позволяющих учитывать множественные услуги и компромиссы между ними в лесном планировании [Baskent et al., 2020] [22]. Прикладные исследования, такие как оценка услуг в лесных экосистемах Турции [Baskent, 2023] [23], показывают, как количественные и стоимостные оценки могут служить основой для конкретных управленческих решений. Несмотря на экспоненциальный рост публикаций в этой области, глобальные обзоры отмечают сохраняющиеся методологические и географические диспропорции [Acharya et al., 2019] [24].

Таким образом, современный фронт исследований характеризуется стремлением преодолеть разрыв между пониманием комплексной динамики экосистемных услуг и необходимостью принятия обоснованных управленческих решений в условиях глобальных изменений. Анализ представленных исследований показывает, что научная парадигма в области экосистемных услуг смещается в сторону интеграции природных, социальных и экономических аспектов.

Современные работы рассматривают экосистемные услуги как динамическую систему

взаимосвязей, зависящую от структуры ландшафта, антропогенных воздействий и социальных факторов. Большое значение приобретают новые методы количественной оценки, дистанционное зондирование, а также моделирование потоков экосистемных услуг.

Развитие таких подходов способствует формированию более устойчивых моделей природопользования и эффективному включению оценки экосистемных услуг в процессы принятия решений на региональном и глобальном уровнях.

Целью данной статьи является проведение комплексного анализа концепции экосистемных услуг лесов, охватывающего её теоретико-методологические основания, существующие классификации, современную критику и арсенал методов экономической оценки. В задачи исследования входит:

1. Реконструкция генезиса понятия и обзор эволюции ключевых классификационных систем (MEA, CICES, NCP).
2. Критический анализ основных направлений дискуссии вокруг концепции, включая этические возражения, проблему терминологической путаницы и сложности практической операционализации.
3. Систематизация методологических подходов к экономической оценке ЭУ лесов, выявление их преимуществ и ограничений.
4. Анализ специфики и факторов, влияющих на разброс результатов оценок в Российской Федерации.
5. Обзор перспективных направлений развития концепции и практических механизмов (сертификация, новые инструменты учёта) для интеграции ценности ЭУ в управленческие решения.

Решение этих задач позволит сформировать целостное представление о современном состоянии, вызовах и возможностях концепции экосистемных услуг как научно-практического инструмента для перехода к устойчивому управлению лесными ресурсами

Материалы и методы исследования

1.Объект исследования и методологический подход

Объектом исследования выступила концепция экосистемных услуг (ЭУ) в её приложении к лесным экосистемам. Работа построена на междисциплинарном подходе, интегрирующем принципы экономики природопользования, экологической экономики, теории природного капитала, лесоведения и социальной экологии. Такой синтез позволяет преодолеть узкую отраслевую специфику и провести комплексный анализ как теоретических основ, так и практических инструментов оценки и управления.

2. Материалы исследования

Исследование базируется на следующих группах материалов:

– Научные публикации и монографии. В качестве теоретической основы и источника эмпирических данных был проведен систематический обзор рецензируемых статей, монографий и обзоров за период 1997–2025 гг., с приоритетом источников, опубликованных после 2019 года. Поиск осуществлялся в международных базах данных (Scopus, Web of Science) и российских (eLibrary, РИНЦ) по ключевым словам: "экосистемные услуги", "оценка экосистемных услуг лесов", "лесной природный капитал", "economic valuation of forest ecosystem services", "ecosystem services criticism". Особое внимание уделялось мета-анализам и обзорным работам, обобщающим мировой и российский опыт.
– Институциональные и аналитические доклады. Анализировались материалы международных организаций и проектов, заложивших основы концепции (Millennium Ecosystem Assessment – MEA, The Economics of Ecosystems and Biodiversity – TEEB, Common International Classification of Ecosystem Services – CICES, IPBES) для изучения эволюции классификационных подходов.
– Данные государственной статистики и отчетности. Привлекались данные Рослесхоза, Росстата и Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) по динамике лесопокрытой площади,

характеристикам лесного фонда, объемам лесопользования.

- Нормативно-правовые акты и стратегические документы: Рассмотрены положения Лесного кодекса РФ, государственных программ, стратегий социально-экономического и низкоуглеродного развития для оценки степени интеграции концепции ЭУ в российскую правовую и управленческую практику.

3. Методы исследования

Для решения поставленных задач использовалась комбинация следующих методов:

- Контент-анализ и дискурс-анализ. Применены для критического анализа научных текстов, выявления доминирующих понятий, терминологических противоречий и нарративов. Этот метод был ключевым для анализа российской научной литературы с целью выявления использования терминов "экосистемные услуги", "экологические функции", "экосистемные функции" и их семантических связей.
- Сравнительный анализ. Использован для сопоставления основных систем классификации ЭУ (MEA, CICES, NCP), их принципов, категорий и сфер применимости. Также применен для анализа достоинств и недостатков различных методов экономической оценки.
- Систематизация и классификация. На основе проведенного анализа были систематизированы методологические подходы к экономической оценке ЭУ, их классифицированы по типам (рыночные, затратные, основанные на предпочтениях), а также структурированы основные направления критики концепции.
- Анализ кейсов (Case-study). На примере конкретных исследований и практических инициатив (например, оценка ЭУ Национального парка «Валдайский», внедрение сертификации по схеме FSC, разработка «Единиц природы») были рассмотрены возможности и ограничения применения теоретических наработок на практике.
- Метод критической рефлексии. Использован для философско-этического осмысления концепции, анализа её антропоцентрических оснований, инструментализации природы и связанных с этим рисков.

4. Ограничения исследования

Основное ограничение исследования связано с высокой динамикой развития концепции ЭУ, появлением новых подходов (таких как NCP) и практических инструментов, что требует постоянного обновления аналитической базы. Кроме того, разрозненность и разнородность методик экономических оценок в России затрудняет их прямое сопоставление и генерализацию, что было учтено в ходе анализа путем акцента на выявлении причин такого разброса, а не на консолидации абсолютных значений.

Результаты

Концепция экосистемных услуг (ЭУ) представляет собой эволюционный продукт научной мысли, оформившийся в ответ на осознание неразрывной связи между благополучием человеческого общества и функционированием природных систем. Идеи о зависимости человека от природы можно проследить в трудах мыслителей от Платона до авторов эпохи Просвещения, однако как формализованный научный конструкт, термин «экосистемные услуги» (в исходной версии «environmental services») был впервые введен в 1970 году в «Докладе об исследовании критических экологических проблем» (SCEP). Последующие десятилетия стали периодом активной концептуализации и развития этого подхода, ключевой вклад в который внесли работы Гретхен Дейли, Роберта Костанцы и других исследователей, а его институциональное закрепление произошло в рамках масштабного проекта «Оценка экосистем на пороге тысячелетия» (Millennium Ecosystem Assessment, MEA) в 2000-х годах.

Каноническое определение, предложенное MEA и ставшее наиболее распространенным, описывает экосистемные услуги как «выгоды, которые люди получают от экосистем». Это определение делает акцент на антропоцентрическом измерении природы, подчеркивая ее утилитарную ценность. Согласно данной логике, природные процессы и объекты обретают значимость

постольку, поскольку они напрямую или косвенно служат удовлетворению человеческих потребностей – от базовых (чистая вода, пища) до сложных духовных и эстетических. Параллельно в научном дискурсе сформировался и более широкий взгляд, рассматривающий ЭУ в связке с понятием природного капитала. В этом контексте экосистемы воспринимаются как актив, или капитальный запас, который производит поток благ (услуг) для общества. Такой экономико-экологический синтез создал основу для попыток количественной оценки этого потока и его интеграции в системы принятия решений, подчеркивая, что деградация природного капитала ведет к прямым экономическим потерям и рискам. Несмотря на широкое распространение, классификация MEA впоследствии подверглась критике за потенциальный «двойной счет», поскольку стоимость поддерживающих услуг может неявно включаться в оценку обеспечивающих, регулирующих и культурных.

Для структурирования огромного многообразия благ, предоставляемых природой, были разработаны системы классификации. Наиболее влиятельной и исторически первой комплексной схемой стала четырехуровневая модель MEA, которая группирует все услуги в четыре обширные категории (рис. 1).

В качестве ответа на эту методологическую проблему была разработана Общая международная классификация экосистемных услуг (CICES), которая исключила категорию «поддерживающих услуг», заменив ее более детальным описанием экосистемных функций и процессов, лежащих в основе конечных благ для человека. Кроме того, такие инициативы, как «Экономика экосистем и биоразнообразия» (TEEB), предложили альтернативные подходы, смещая фокус с «услуг» на «вклад природы в благополучие людей» (Nature’s Contributions to People, NCP), стремясь лучше учесть культурное и контекстуальное разнообразие восприятия природы. Однако статичная классификация услуг не в полной мере отражает суть концепции как динамического процесса взаимодействия природы и общества. Ключевым для понимания является механизм трансформации *природного капитала* (stock) в поток конкретных благ для человека через *экосистемные услуги* (flow), а также роль институтов *управления* в регулировании этой системы. На рис. 1 представлена циклическая модель, визуализирующая эти фундаментальные взаимосвязи. Она демонстрирует, как состояние экосистем определяет спектр предоставляемых услуг, которые, в свою очередь, формируют основу для социально-экономического благополучия. Замыкает цикл блок управления, решения в котором оказывают прямое обратное воздействие на состояние природного капитала, определяя его устойчивость в долгосрочной перспективе (рис. 1)



Рисунок 1. Четырехуровневая модель MEA
Figure 1. The Four-Level MEA Model
Источник: [3]/Source: [3]

Однако статичная классификация услуг не в полной мере отражает суть концепции как динамического процесса взаимодействия природы и общества. Ключевым для понимания является механизм трансформации *природного капитала* (stock) в поток конкретных благ для человека через *экосистемные услуги* (flow), а также роль институтов *управления* в регулировании этой системы. На рис. 2 представлена циклическая модель, визуализирующая эти фундаментальные взаимосвязи. Она демонстрирует, как состояние экосистем определяет спектр предоставляемых услуг, которые, в свою очередь, формируют основу для социально-экономического благополучия. Замыкает цикл блок управления, решения в котором оказывают прямое обратное воздействие на состояние природного капитала, определяя его устойчивость в долгосрочной перспективе (рис. 2)

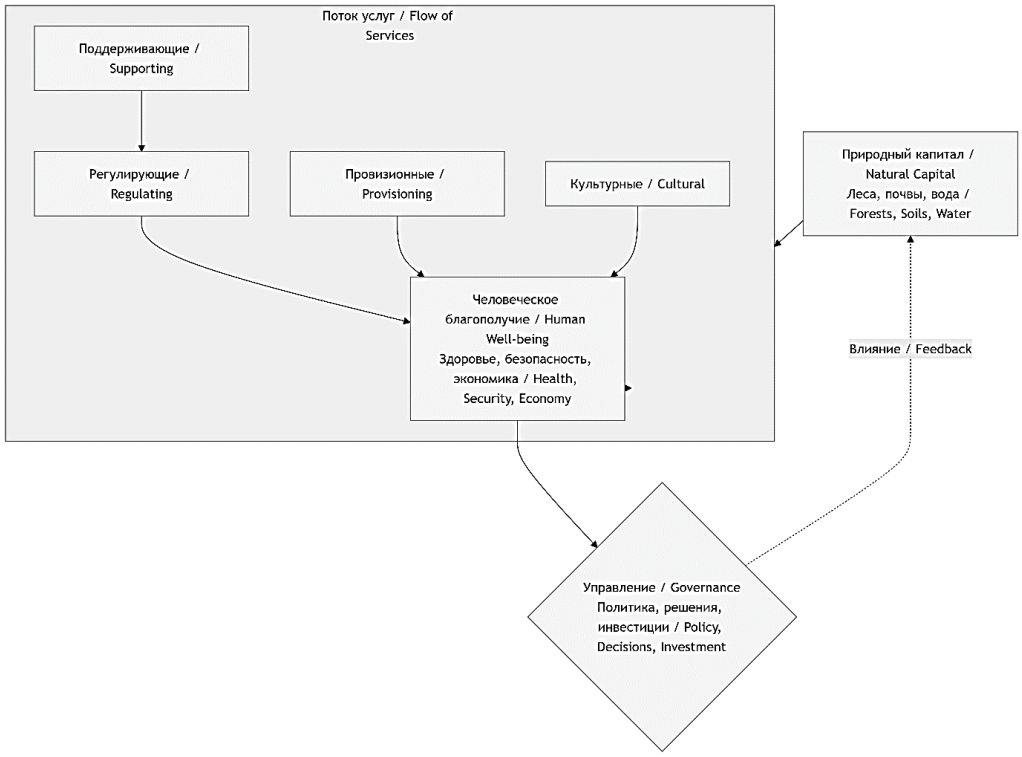


Рисунок 2. Концептуальная схема взаимосвязей
Figure 2. Interrelation Model of the Ecosystem Service Concept
Источник: собственная композиция авторов
Source: Authors' own elaboration

Представленная концептуальная модель (рис. 2) задает общее понимание взаимосвязей в системе «природный капитал — услуги — благо». Однако для практической работы исследователей и лиц, принимающих решения, необходимы конкретные, стандартизированные инструменты категоризации. Именно с этой целью были разработаны различные системы классификации экосистемных услуг, которые структурируют и детализируют общий поток услуг, показанный на схеме. В Таблице 1 приведены основные из таких систем, их ключевые категории и области применения.

.

Таблица 1
Table 1

Основные системы классификации экосистемных услуг
Major systems of ecosystem services classification

Критерий / Criterion	Оценка экосистем на пороге тысячелетия (MEA) / Millennium Ecosystem Assessment (MEA)	Общая международная классификация (CICES) / Common International Classification of Ecosystem Services (CICES)	Вклад природы в благополучие людей (NCP / TEEB) / Nature's Contributions to People (NCP / TEEB)
Основной принцип / Core Principle	Антропоцентризм: выгоды для человека. / Anthropocentrism: benefits for humans.	Структурированность для учёта и оценки; избегание двойного счёта. / Structured for accounting and valuation; avoids double counting.	Плюрализм: признание множества ценностей и точек зрения. / Pluralism: recognition of multiple values and perspectives.
Ключевые категории / Key Categories	1. Обеспечивающие / Provisioning 2. Регулирующие / Regulating 3. Культурные / Cultural 4. Поддерживающие / Supporting	Иерархическая система: Разделы > Группы > Классы. Фокус на конечных услугах. / Hierarchical system: Sections > Groups > Classes. Focus on final services.	18 основных категорий, сгруппированных в три направления: Материальные, Нематериальные, Регуляторные. / 18 main categories grouped into three dimensions: Material, Non-material, Regulating.
Отношение к «поддерживающим» процессам / Treatment of 'Supporting' Processes	Выделяет как отдельную категорию услуг. / Identified as a separate service category.	Исключает как отдельную категорию, рассматривает как базовые процессы и функции. / Excluded as a separate category; considered as underlying processes and functions.	Рассматривает как часть фундаментальных регуляторных процессов. / Considered as part of fundamental regulating processes.
Преимущества / Advantages	Простота, наглядность, историческая значимость. / Simplicity, clarity, historical significance.	Методологическая строгость, пригодность для бухгалтерского учёта. / Methodological rigor, suitability for accounting purposes.	Учёт культурного контекста, разнообразия ценностей, включённость. / Accounts for cultural context, value diversity, inclusiveness.
Критика / Critique	Риск двойного счёта (поддерживающие услуги). / Risk of double counting (supporting services).	Сложность, излишняя формализация. / Complexity, excessive formalization.	Размытость границ, сложность операционализации для количественной оценки. / Blurred boundaries, difficult to operationalize for quantitative assessment.

По мере институционализации в глобальной природоохранной политике и научной практике, концепция экосистемных услуг (ЭУ) столкнулась с серьёзной содержательной и этической критикой. Эта критическая рефлексия, интенсивно развивающаяся в последние годы, сформировала современную интеллектуальную повестку, указывая на методологические ограничения и философские основания данного подхода.

1. Антропоцентризм и редукция ценности природы. С момента своего появления основным вектором критики концепции ЭУ является её антропоцентричная сущность. Подход, определяющий ценность природы через призму «выгод для человека» (MEA, 2005) [3], рассматривается многими исследователями как проявление инструментальной рациональности, которая редуцирует сложные экологические системы до набора рыночных или квазирыночных «услуг». Критики отмечают, что такая логика рискует окончательно закрепить утилитарно-потребительское отношение к природе, игнорируя её интринсическую (внутреннюю) ценность – ценность, существующую независимо от человеческих потребностей. Этот подход ставит под сомнение этические и научные основания охраны видов и экосистем (например, многих почвенных микроорганизмов или обширных болотных комплексов), чья прямая полезность для человека неочевидна или плохо поддаётся экономической оценке.

2.Концептуальная путаница и терминологическое разнообразие в научном дискурсе. На практике применение концепции ЭУ, особенно в междисциплинарных исследованиях, сопровождается значительной методологической нечёткостью. В научной литературе наблюдается устойчивая тенденция к смешению ключевых понятий: «экосистемная функция» (объективный биогеофизический процесс), «экосистемная услуга» (поток выгод от этой функции людям) и «ценность» (экономическая, социальная или иная оценка этой услуги).

Эта проблема особенно ярко проявляется в российской научной среде, что подтверждается актуальными исследованиями. Систематический анализ публикаций российских учёных, проведённый в 2025 году, показал, что в русскоязычных работах параллельно используются несколько терминов. Непосредственно термин «экосистемные услуги» применяется примерно в 27% статей, в то время как более традиционные понятия, такие как «экологические функции» (26.1%) и «экосистемные функции» (6.6%), остаются широко распространёнными. Такое терминологическое разнообразие отражает не только адаптацию заимствованной концепции к локальному научному контексту, но и более глубокий концептуальный разрыв между классической биолого-экологической парадигмой, описывающей природные процессы, и экономико-управленческой парадигмой, фокусирующейся на их полезности. Это затрудняет сопоставление исследований и разработку единых методик оценки.

3. Проблемы операционализации и практического внедрения. Даже при успешной оценке возникает сложность перевода теоретических результатов в плоскость практических решений. Анализ российских исследований городских ЭУ (2021-2025 гг.) указывает на существенный разрыв между наукой и управлением. Хотя в 44% публикаций упоминается возможное применение результатов, лишь в 14% работ конкретно обсуждаются меры по их внедрению, а в 42% этот вопрос не затрагивается вовсе. Кроме того, большая часть публикаций (81%) не опирается на какую-либо из общепринятых международных классификаций (MEA, TEEB, CICES), что снижает их сопоставимость и потенциал для интеграции в глобальный контекст [26]. Это свидетельствует о том, что в российских исследованиях доминирует академический интерес, в то время как прикладной аспект – разработка конкретных инструментов для городского планирования, экологической политики или механизмов оплаты за ЭУ – остаётся слабо проработанным.

4. Узкоэкономический фокус и игнорирование экологических диссервисов. Критика также направлена на преобладание в оценках ЭУ узкоэкономического подхода, который стремится выразить все блага в денежных единицах. Такой подход сталкивается с непреодолимыми трудностями при оценке культурных (эстетических, духовных, рекреационных) услуг, ценность которых субъективна и контекстуально зависима. Одновременно в научном дискурсе, особенно в российской практике, часто игнорируется концепция «экосистемных диссервисов» – негативных последствий или издержек, которые экосистемы могут нести для человека (например,

аллергены растений, конфликты с дикими животными в городах). Как показал анализ 2025 года, в российских журналах этот термин практически не используется; вместо него авторы описывают «экологические риски или проблемы», что не является концептуальным аналогом и смещает фокус с взаимодействия «человек-экосистема» на проблемы самой экосистемы [26].

5. Альтернативные пути развития и интеграция. В ответ на эти вызовы происходит эволюция концепции и поиск альтернативных путей. Одним из них является смещение акцента с оценки услуг на управление экосистемными функциями как более нейтральным и научно строгим понятием. Другим значимым трендом является разработка практических механизмов, таких как добровольная лесная сертификация (например, по схеме FSC), которая напрямую увязывает хозяйственные практики с поддержанием конкретных услуг: депонирования углерода, сохранения биоразнообразия, поддержания водного режима и других. Этот подход демонстрирует практический путь к «интернализации экстерналий» – включению экологической ценности в экономические решения компаний. На государственном уровне в России в 2025 году инициирована разработка концепции «Единицы природы», направленной на создание стандартизированного инструмента учёта природного капитала и экосистемных услуг для привлечения инвестиций в их сохранение. Этот шаг указывает на попытку перехода от чисто академических оценок к созданию работающих экономико-управленческих инструментов. Таким образом, современная критика не отвергает концепцию экосистемных услуг полностью, но последовательно выявляет её ограничения: от этического антропоцентризма до методологической неразберихи и слабой практической ориентированности. Ответом на эту критику становится усложнение теоретического аппарата, поиск гибридных понятий и, что наиболее важно, разработка конкретных институциональных и рыночных механизмов, способных транслировать ценность природы в язык реальных управленческих и инвестиционных решений.

Концепция экосистемных услуг лесов, рассмотренная в предыдущем разделе, обеспечивает системное представление о широком спектре выгод, предоставляемых этими природными системами. Однако для практического внедрения данного подхода в процессы управления и принятия экономических решений необходим переход от качественного описания к количественной оценке.

Экономическая оценка экосистемных услуг (ЭУ) представляет собой комплексную научно-практическую задачу, главная сложность которой обусловлена преимущественно нерыночным характером большинства предоставляемых благ. В отличие от древесины или недревесных продуктов, которые имеют явную рыночную стоимость, такие жизненно важные услуги, как климаторегуляция, водоохранные функции, поддержание биоразнообразия, эстетическая и рекреационная ценность, не имеют прямого рыночного выражения. Этот фундаментальный «провал рынка» исторически вел к их систематической недооценке и, как следствие, к принятию управленческих решений, ориентированных на краткосрочную ресурсную ренту в ущерб долгосрочной экологической устойчивости.

Таким образом, потребность в разработке и применении корректных методов экономической оценки становится ключевым императивом. Интеграция концепции экосистемных услуг в систему принятия решений невозможна без инструментов, позволяющих перевести экологическую ценность на язык экономических показателей и управленческих аргументов. Следующий раздел посвящен детальному анализу методологического аппарата, используемого для решения этой задачи, включая классификацию основных подходов, оценку их преимуществ и ограничений, а также обзор специфики и результатов оценок, проведенных в российском контексте.

Экономическая оценка экосистемных услуг (ЭУ), предоставляемых лесами, представляет собой комплексную научно-практическую задачу,

обусловленную преимущественно нерыночным характером этих благ. В отличие от древесины или недревесных продуктов, большинство регулирующих (климаторегуляция, очистка воды) и культурных (рекреация, эстетическая ценность) услуг не имеют явной рыночной цены, функционируя как общественные блага. Этот «провал рынка» традиционно вел к их систематической недооценке в процессе принятия управленческих решений, где приоритет отдавался сиюминутным, легко измеримым выгодам, таким как прибыль от заготовки древесины.

Эволюция методологии оценки является ответом на эту проблему. Если первоначальные подходы были сосредоточены на денежной оценке отдельных услуг, то современный этап характеризуется стремлением к комплексному учету всего спектра ЭУ, предоставляемых лесными экосистемами. Ключевым трендом последнего десятилетия стал экспоненциальный рост количества исследований, посвященных данной тематике, что отражает растущее признание значимости природного капитала для устойчивого развития. Однако, как показывают мета-анализы, несмотря на увеличение публикационной активности, работы, непосредственно посвященные экономическим оценкам ЭУ лесов, по-прежнему составляют лишь небольшую часть общего массива. Это свидетельствует о сохраняющейся методологической сложности и необходимости дальнейшего развития данного научного направления.

В современной экономике природопользования сформировался обширный и методологически зрелый арсенал подходов к стоимостной оценке экосистемных услуг (ЭУ). Выбор конкретного метода принципиально зависит от типа выявляемых ценностей — рыночных (имеющих прямую цену) или нерыночных (например, регулирующих или культурных) — и доступного источника данных, основанного либо на фактическом наблюдаемом поведении экономических агентов, либо на их заявленных предпочтениях в специальных обследованиях.

Для оценки лесных экосистемных услуг, сочетающих как материальные блага (древесина, недревесная продукция), так и жизненно важные нерыночные функции (углерододепонирование, водоохранная роль, рекреация), применяется комбинация этих подходов. С одной стороны, используются методы, опирающиеся на рыночную стоимость или издержки замещения утраченных услуг. С другой — для количественной оценки неосязаемых выгод всё чаще привлекаются методы, выявляющие готовность населения платить за сохранение экосистем, например, метод условной оценки.

Таким образом, эффективная оценка требует системного применения разнородных методик, сведенных в единую аналитическую рамку. Ключевые подходы, их теоретические основы, области применения, преимущества и ограничения при оценке лесных ЭУ систематизированы в Таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Основные методы экономической оценки экосистемных услуг лесов
Main Methods for Economic Valuation of Forest Ecosystem Services

Категория метода / Method Category	Конкретные методы / Specific Methods	Принцип действия и сфера применения / Principle and Scope of Application	Преимущества / Advantages	Ограничения / Limitations
Методы прямых рыночных цен / Direct Market Pricing Methods	Анализ рыночных цен / Market Price Analysis	Использование существующих рыночных цен на товары (древесина, недревесные	Объективность, простота расчетов. / Objectivity, simplicity of calculations.	Оценивает лишь узкий сегмент обеспечивающих услуг, игнорируя

		продукты). / Using existing market prices for goods (timber, non-timber forest products).		основную ценность леса. / Evaluates only a narrow segment of provisioning services, ignoring the core value of the forest.
Стоимостные (затратные) методы / Cost-Based Methods	Метод восстановительной стоимости / Replacement Cost Method	Оценка затрат на искусственное воспроизводство утраченной услуги (напр., строительство водоочистных сооружений). / Estimating the cost of artificially recreating a lost service (e.g., building water treatment facilities).	Наглядность для лиц, принимающих решения. / Clear and understandable for decision-makers.	Отражает не реальную ценность, а стоимость замены; зависит от технологии. / Reflects not the real value, but the cost of replacement; dependent on the chosen technology.
	Метод затрат на перемещение / Avoided Cost Method	Оценка расходов, которых общество избегает благодаря существованию ЭУ (напр., снижение затрат на здравоохранение). / Estimating the expenses society avoids due to the existence of ES (e.g., reduced healthcare costs).	Позволяет количественно оценить выгоды от регулирующих услуг. / Allows for the quantification of benefits from regulating services.	Сложность установления прямой причинно-следственной связи. / Difficulty in establishing a direct causal link.
Методы, основанные на выявленных предпочтениях / Revealed Preference Methods	Метод гедонистического ценообразования / Hedonic Pricing Method	Статистический анализ влияния экологических характеристик (близость к лесу) на рыночную стоимость связанных благ (недвижимости). / Statistical analysis of how environmental characteristics (proximity to a forest) affect the market price of related goods (real estate).	Основан на реальном рыночном поведении. / Based on actual market behavior.	Требует обширных данных; сложность изоляции экологического фактора. / Requires extensive data; difficulty in isolating the environmental factor.
	Метод транспортных затрат / Travel Cost Method	Оценка рекреационной ценности по затратам (время, деньги), которые несут посетители для	Эффективен для оценки культурных услуг охраняемых природных территорий. /	Не учитывает ценность существования для не посетителей. / Does not account

		доступа к территории. / Estimating recreational value based on the costs (time, money) visitors incur to access a site.	Effective for evaluating cultural services of protected natural areas.	for the existence value for non-visitors.
Методы, основанные на выраженных предпочтениях / Stated Preference Methods	Метод условной оценки (CVM) / Contingent Valuation Method (CVM)	Прямой опрос населения о его «готовности платить» (WTP) за сохранение или улучшение ЭУ либо «готовности принять компенсацию» (WTA) за его утрату. / Directly surveying the public about their "Willingness to Pay" (WTP) for preserving/improving an ES or "Willingness to Accept" (WTA) compensation for its loss.	Единственный метод, способный оценить непотребительские ценности (напр., ценность биоразнообразия). / The only method capable of evaluating non-use values (e.g., the value of biodiversity).	Подвержен гипотетическим смещениям, зависимости от формулировок вопросов. / Susceptible to hypothetical bias, framing effects.
	Анализ выбора (CE) / Choice Experiment (CE)	Моделирование выбора между альтернативными сценариями управления с разными атрибутами (экологические, экономические). / Modeling choices between alternative management scenarios with different attributes (ecological, economic).	Позволяет оценить ценность отдельных атрибутов и выявить компромиссы. / Allows for valuing individual attributes and identif	

Источник [27-30]
Source [27-30]

Региональная специфика и разброс оценок в Российской Федерации

Опыт экономической оценки лесных экосистемных услуг (ЭУ) в России, накопленный за последние два десятилетия, представляет собой репрезентативную модель, в которой отражаются как значительные успехи в освоении методологического инструментария, так и системные вызовы, характерные для глобальной практики. Проведенные исследования на различных пространственных уровнях — от локальных (отдельные ООПТ, лесничества) до национального — эмпирически подтверждают фундаментальный тезис о том, что совокупная стоимость всех услуг леса (климаторегулирующих, водоохранных, рекреационных, биоразнообразия) на один-два порядка превышает стоимость заготавливаемой древесины. Это ставит под сомнение традиционную ресурсную модель лесопользования, ориентированную преимущественно на древесный доход.

Однако, как и в международных исследованиях, российские оценки отличаются значительной вариабельностью результатов, что осложняет их прямое использование для макроэкономического планирования или стоимостного обоснования природоохранных мероприятий. Например, агрегированные оценки общей стоимости экосистемных услуг всех лесов страны варьируются в диапазоне от 1.4% до 3.5% ВВП. В то же время, в отдельных, преимущественно «лесных» и слабо индустриализированных регионах с высокой сохранностью природных систем (например, Республики Тыва, Алтай, Калмыкия, Архангельская область), вклад ЭУ в региональную экономику может достигать и даже превышать 10-15% ВВП, выступая ключевым компонентом их природного капитала.

Эта вариативность не является случайной и обусловлена комплексом взаимосвязанных факторов, систематизированных как в российских, так и в международных мета-анализах:

- Методологический плюрализм. Применение разных методов к одному объекту (например, дорогостоящей альтернативы vs. условной оценки для рекреации) закономерно дает расходящиеся результаты. Выбор метода часто зависит не от оптимальности, а от доступности данных.
- Гетерогенность социально-экономического и культурного контекста. «Готовность платить» за сохранение лесов критически зависит от уровня доходов населения, удаленности территории, культурных ценностей и альтернативных возможностей использования земель. Оценка одной и той же услуги (например, эстетической ценности ландшафта) в густонаселенном Подмосковье и в удаленном районе Сибири будет принципиально разной.
- Пространственно-типологическое разнообразие лесного фонда. Стоимость услуг бореальной тайги, южных дубрав или горных лесов Кавказа несопоставима из-за различий в продуцируемых услугах (например, углерододепонирующий потенциал), биоразнообразии и воспринимаемой рекреационной привлекательности.
- Проблема масштаба и агрегирования. Локальные исследования, такие как оценка услуг Национального парка «Валдайский» (28.6–58.9 млн долл. США в год) или Кавказского заповедника, как правило, выявляют более высокую удельную стоимость на гектар благодаря концентрации ценных услуг. При экстраполяции на макроуровень эти значения «размываются», включая малоценные с точки зрения конкретных услуг, но обширные территории.
- Качество и доступность исходных данных. Недостаточная изученность biophysicalx потоков услуг (например, точного объема водорегулирования конкретным лесным массивом) часто вынуждает исследователей использовать упрощенные трансферные функции или бенчмарки, заимствованные из зарубежных исследований, что вносит дополнительную неопределенность.

В свете современных тенденций и потребностей зеленой экономики, для российской науки и практики управления актуальна двойная задача:

Во-первых, продолжение пилотных оценок для ключевых, социально-экономически значимых территорий (особо охраняемые природные территории, зоны влияния крупных агломераций, защитные леса).

Во-вторых, и это главное, переход к систематизации, гармонизации и мета-анализу уже накопленного массива разрозненных оценок. Создание национальной базы данных стоимостных оценок ЭУ с детальными метаданными (метод, контекст, характеристики экосистемы) позволит выявить устойчивые региональные и типологические закономерности, разработать контекстно-зависимые трансферные значения и, в конечном итоге, повысить достоверность и сравнимость выводов. Именно такой системный подход, а не единичные расчеты, способен предоставить надежную экономическую аргументацию для модернизации лесной политики, пересмотра системы платежей за пользование лесами и интеграции природного капитала в систему национальных счетов.

Обсуждение

Проведённый анализ теоретических подходов и практик экономической оценки экосистемных услуг (ЭУ), в особенности в российском контексте, позволяет выявить ряд ключевых дискуссионных моментов, проблем внедрения и перспективных направлений. Обсуждение структурировано вокруг трёх взаимосвязанных групп вопросов: философско-методологических противоречий, институционально-управленческих барьеров и методических вызовов операционализации.

Философско-методологические основания и критика антропоцентризма. Сама попытка экономической оценки природных благ вызывает фундаментальные вопросы о границах применимости экономического языка к экологическим процессам. Критика, отражённая в работе, ставит под сомнение возможность построения универсальной «объективной» оценки, если исходной предпосылкой выступает утилитарный, опосредованный человеком взгляд на ценность природы [31]. Это приводит к терминологической путанице и дискуссиям о корректности перевода экологических функций в категорию «услуг» [32. Как отмечает Василенко [33], стремление к денежному выражению всех благ может воспроизводить инструментальную логику, способствовавшую кризису. Этот этико-философский вопрос требует постоянного междисциплинарного диалога, выходящего за рамки экономики [34].

Институциональные барьеры и практическая реализуемость в России. Значительный разброс результатов оценок ЭУ лесов (часто многократно превышающих стоимость древесины) остаётся виртуальным до тех пор, пока не созданы механизмы трансляции этой стоимости в реальные экономические стимулы или правовые нормы [35]. Существующая нормативная база, в частности, Лесной кодекс РФ, в своей текущей редакции не создаёт адекватных условий для учёта полной ценности лесных экосистем [36]. В этом свете такие инструменты, как добровольная лесная сертификация или пилотные проекты по платежам за экосистемные услуги (ПЭУ), рассматриваются как попытка «заземлить» теорию [37]. Однако их успех зависит от преодоления инерции сырьевой модели лесопользования и формирования благоприятной нормативной среды. Как показывает анализ, доминирующий тренд в отечественных исследованиях пока остаётся скорее академическим, нежели прикладным [38].

Методические вызовы и пути операционализации оценки. Значительная вариативность результатов экономических оценок ЭУ в России, продемонстрированная в работе, является не столько ошибкой, сколько индикатором методологической сложности и влияния регионального контекста [39,40]. Яркая региональная специфика, например, в Республике Алтай [41], подтверждает, что ценность природного капитала не сводима к унифицированным коэффициентам. Ключевой проблемой остаётся разрыв между расчётами и их использованием в управлении. Одной из причин является отсутствие национальных стандартов валидации, особенно для культурных услуг и услуг биоразнообразия, что снижает доверие практиков к получаемым оценкам. Важным шагом к преодолению этого разрыва может стать развитие прикладных, адаптированных к конкретным управленческим задачам методик, подобных алгоритму для оценки зелёных насаждений в условиях мегаполиса [42].

Таким образом, прогресс в области оценки ЭУ видится не в умножении изолированных расчётов, а в стратегическом движении к построению целостной системы экосистемного учёта. Эта система должна сочетать стандартизированные, но гибкие протоколы для агрегирования данных на разных уровнях со смещением фокуса с генерации абстрактных стоимостных величин на разработку управленчески релевантных индикаторов состояния экосистем. Наиболее перспективным направлением представляется пилотирование и внедрение рыночно-ориентированных инструментов, таких как ПЭУ, в рамках существующих и новых институциональных рамок. Лишь через такую интеграцию оценок в реальные экономические и управленческие контуры доказанная научными методами ценность экосистем России сможет стать

действенным фактором перехода к модели устойчивого развития.

Заключение

Проведенный в работе системный анализ концепции экосистемных услуг (ЭУ) лесов позволяет утверждать, что за последние десятилетия она прошла путь от новаторской идеи, призванной сделать «невидимую» ценность природы, видимой для экономики, до одного из центральных элементов глобальной экологической повестки. Исследование подтвердило, что концепция выполнила роль мощного коммуникативного инструмента, установив общий язык для диалога между экологами, экономистами, политиками и обществом. Благодаря классификациям, таким как MEA и CICES, удалось структурировать сложный спектр благ, предоставляемых лесами, от обеспечивающих до культурных, подчеркнув их системную взаимосвязь и фундаментальное значение для устойчивого развития.

Однако, как показал анализ, институционализация концепции не сняла, а, напротив, выявила её глубинные концептуальные и методологические противоречия. Основным вызовом остается антропоцентричная сущность подхода, которая, редуцируя природу до набора «услуг», рискует укрепить утилитарное отношение к ней и оставить за скобками вопрос о её внутренней ценности. Эта проблема усугубляется в условиях российского научного и управленческого дискурса, где сохраняется терминологический разрыв между традиционным пониманием «экологических функций» и новой экономико-управленческой логикой «услуг», а результаты многочисленных оценок зачастую не трансформируются в конкретные регуляторные или рыночные механизмы. Обширный арсенал методов экономической оценки, от анализа рыночных цен до методов выраженных предпочтений, хотя и демонстрирует впечатляющие цифры, многократно превышающие стоимость заготавливаемой древесины, сам по себе не решает проблемы. Он лишь констатирует колоссальный разрыв между экономической значимостью лесных ЭУ и их текущей «ценой», равной нулю в большинстве систем принятия решений.

Перспективы преодоления этих ограничений видятся не в отказе от концепции, а в её содержательном развитии и прагматичной интеграции. Современные тенденции указывают на два взаимодополняющих пути. Первый – это концептуальное углубление в сторону признания плюрализма ценностей, что находит отражение в подходе «вклад природы в благополучие людей» (NCP), и смещение фокуса с управления «услугами» на управление экологическими процессами и функциями как более нейтральной и научно строгой основой. Второй, и, возможно, ключевой путь – это создание работающих экономико-правовых инструментов, которые осуществляют реальную «интернализацию экстерналий». К таким механизмам можно отнести добровольную лесную сертификацию (например, FSC), которая прямо связывает рыночное преимущество продукции с документально подтвержденным сохранением конкретных ЭУ, и новые инициативы по стандартизации учёта природного капитала (концепция «Единицы природы»). Именно в этом направлении – не отмены, а практической реализации принципов концепции ЭУ через конкретные институты, стандарты и рыночные сигналы – заключается главный потенциал для трансформации системы управления лесами России. Только перевод ценности лесных экосистем из области теоретических расчетов и критических дискуссий в плоскость конкретных управленческих решений, инвестиционных стратегий и потребительского выбора позволит реализовать заложенный в концепции ЭУ потенциал для перехода к подлинно устойчивому и климатически ответственному лесопользованию, отвечающему как национальным, так и глобальным экологическим императивам.

Список литературы

1. Daily G.C. (Ed.) Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. Washington, D.C.: Island Press, 1997.
2. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature. 1997; 387 (6630): 253–260. – DOI: https://doi.org/10.1038/387253a0.
3. Millennium Ecosystem Assessment (MEA). Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment. Washington, D.C.: Island Press, 2005.
4. Haines-Young R., Potschin M.B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4. – 2013. – URL: https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/09/CICES-V4_Final_26092012.pdf (дата обращения: 24.03.2025).
5. Díaz S., Pascual U., Stenseke M., Martín-López B., Watson R.T., Molnár Z., Hill R., Chan K.M.A., Baste I.A., Brauman K.A., Polasky S., Church A., Lonsdale M., Larigauderie A., Leadley P.W., van Oudenhoven A.P.E., van der Plaat F., Schröter M., Lavorel S., Aumeeruddy-Thomas Y., Bukvareva E., Davies K., Demissew S., Erpul G., Failler P., Guerra C.A., Hewitt C.L., Keune H., Lindley S., Shirayama Y. Assessing nature's contributions to people. Science. 2018; 359 (6373): 270-272. – DOI: https://doi.org/10.1126/science.aap8826.
6. Burkhard B., Kroll F., Nedkov S., Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators. 2012; 21: 17-29. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.06.019
7. Burkhard B., Petrosillo I., Costanza R. Ecosystem services – Bridging ecology, economy and social sciences. Ecological Complexity. 2010; 7 (3): 257-259. –
8. Rau A.-L., Unger B., Schröter M. Temporal dynamics of ecosystem services. Ecological Economics. 2018; 151: 122-130. – DOI:10.1016/j.ecolecon.2018.05.009 Bennett E.M., Peterson G.D., Gordon L.J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecology Letters. 2009; 12 (12): 1394-1404. – DOI: https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x.
9. Schröter M., van der Zanden E.H., van Oudenhoven A.P.E., Remme R.P., Serna-Chavez H.M., de Groot R.S., Opdam P. Ecosystem Services as a Contested Concept: A Synthesis of Critique and Counter-Arguments. Conservation Letters. 2014; 7 (6): 514-523. – DOI: 10.1111/conl.12091
10. Silvertown J. Have ecosystem services been oversold? Trends in Ecology & Evolution. 2015; 30 (11): 641-648. – DOI: 10.1016/j.tree.2015.08.007
11. Wunder S. Payments for environmental services: Some nuts and bolts. CIFOR Occasional Paper No. 42. – Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2005. – URL: https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-42.pdf
12. Wunder S. Revisiting the concept of payments for environmental services. Ecological Economics. 2015; 117: 234-243. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.03.016.
13. Экосистемные услуги России: прототип национального доклада. Т. 1: Услуги наземных экосистем / [С.Н. Бобылёв, В.И. Букварёва, В.И. Грабовский и др.]; под ред. Е.Н. Букварёвой, Д.Г. Замолодчикова. — М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. — 148 с. — ISBN 978-5-93699-080-9.
14. Wang L., Zheng H., Chen Y., Ouyang Z., Hu X. Systematic review of ecosystem services flow measurement: Main concepts, methods, applications and future directions. Ecosystem Services. 2022; 58: 101479. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101479.
15. Assis J.C., Hohlenwerger C., Metzger J.P., Rhodes J.R., Duarte G.T., da Silva R.A., ... & Ribeiro M.C. Linking landscape structure and ecosystem service flow. Ecosystem Services. 2023; 62: 101535. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101535.
16. Felipe-Lucia M.R., Guerrero A.M., Alexander S.M., Ashander J., Baggio J.A., Barnes M.L., ... & Dee L.E. Conceptualizing ecosystem services using social–ecological networks. Trends in Ecology & Evolution. 2022; 37 (3): 211-222. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.11.007.

17. Roces-Díaz J.V., Santín C., Martínez-Vilalta J., Doerr S.H. A global synthesis of fire effects on ecosystem services of forests and woodlands. Frontiers in Ecology and the Environment. 2022; 20 (3): 170-178. – DOI: https://doi.org/10.1002/fee.2450.
18. Cheng X., Van Damme S., Li L., Uyttenhove P. Evaluation of cultural ecosystem services: A review of methods. Ecosystem Services. 2019; 37: 100925. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100925.
19. Garcia-Pardo K.A., Moreno-Rangel D., Dominguez-Amarillo S., Garcia-Chavez J.R. Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation: A review of the methods applied. Urban Forestry & Urban Greening. 2022; 74: 127636. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127636.
20. Wu L., Fan F. Assessment of ecosystem services in new perspective: A comprehensive ecosystem service index (CESI) as a proxy to integrate multiple ecosystem services. Ecological Indicators. 2022; 138: 108800. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108800.
21. Baskent E.Z. Characterizing and assessing key ecosystem services in a representative forest ecosystem in Turkey. Ecological Informatics. 2023; 74: 101993. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.101993.
22. Schmidt S., Albert C. Enhancing multiple ecosystem services: Nature-based measures outperform technical interventions in river management. Ecosystem Services. 2025;76: 101795. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101795.
23. Acharya R.P., Maraseni T., Cockfield G. Global trend of forest ecosystem services valuation–An analysis of publications. Ecosystem Services. 2019; 39: 100979. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979.
24. Кошкина Н. Экосистемные услуги и опыт их экономических оценок: исследования идут в разных странах не одно десятилетие. – InfraGreen. – 2025. – 2 декабря. – URL: https://infragreen.ru/ekosistiemnyie-uslughi-i-opyt-ikh-ekonomichieskikh-otsienok-issliedovaniia-idut-v-raznykh-stranakh-nie-odno-diesiatilietiie/ (дата обращения: 02.12.2025).
25. Константинова А., Душкова Д., Матасов В., Гаева Д., Довлетярова Э., Тахерхани М. Анализ российских исследований городских экосистемных услуг. – Экогород.ру. – 2025. – 3 февраля. – URL: https://ecourbanist.ru/ecosystem-serv/analiz-rossijskih-issledovanij-gorodskih-ekosistemnyh-uslug/ (дата обращения: 02.12.2025).
26. Ansong M., Gissi E., Calado H. The economic values of global forest ecosystem services: A meta-analysis. Ecological Economics. 2021; 189: 107145. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107145.
27. Jumiyati S. Economic Valuation of Forest Ecosystem Services: Methods, Applications, and Policy Implications. Forestry: Jurnal Ilmu Kehutanan. 2025; 2 (1): 1-10. – URL: https://doi.org/10.25299/forestry.2025.vol2(1).25136 (дата обращения: 24.03.2025).
28. Kubo M., A T. Assessment of forest ecosystem service research trends and methodological approaches at global level: a meta-analysis. Environmental Systems Research. 2019; 8 (1): 22. – DOI: https://doi.org/10.1186/s40068-019-0142-4.
29. Кузьмичев Е.П., Трушина И.Г., Трушина Н.И. Основные методические подходы к оценке экосистемных услуг в зарубежных странах: обзор проблемы. – Лесной вестник. – 2021. – Т. 25. – № 1. – С. 10-18.
30. Бобылев С.Н., Горячева А.А. Идентификация и оценка экосистемных услуг: международный контекст. – Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. – 2019. – Т. 14. – № 1. – С. 225-236.
31. Розенберг А.Г. Истоки современной истории экосистемных услуг. – Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2017. – Т. 26. – № 1. – С. 5-14.
32. Василенко Н.В. Экосистемные услуги: сущность, виды и риски. – В кн.: Актуальные проблемы развития хозяйствующих субъектов, территорий и систем регионального и муниципального управления. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2019. – С. 75-77.

33. Соловьева С.В. Экономический и биологический инструментарий оценки экосистемных услуг России. – В кн.: возможные сценарии будущего россии и мира: междисциплинарный дискурс. – М.: Цифровичок, 2020. – С. 566-567.
34. Неверов А.В., Бахед Х.А.Б. Формирование концептуальных основ построения стоимостного учета экосистемных услуг лесов. – 2022. – 15 с. – Рукопись депонирована в ВИНИТИ РАН № 125-В2022 от 07.06.2022.
35. Гагарин Ю.Н. Концепция проекта федерального закона «Лесной кодекс Российской Федерации». – Вопросы лесной науки. – 2020. – Т. 3. – № 3. – С. 1-45.
36. Поляков В.В. Платежи за экосистемные услуги как инструмент воспроизводства природно-ресурсного капитала. – Экономика и экология территориальных образований. – 2020. – № 3. – С. 13-19.
37. Раменская Л.А. Применение концепции экосистем в экономико-управленческих исследованиях. – Управленец. – 2020. – Т. 11. – № 4. – С. 18-27.
38. Юрак В.В., Игнатьева М.Н. Экономическая оценка: от природных ресурсов до экосистемных услуг. – Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. – 2022. – № 6. – С. 65-99.
39. Врагова Е.А. Исследование концепции экосистемных услуг и их экономическая оценка в целях устойчивого развития. – Актуальные исследования. – 2022. – № 24 (103). – С. 82-88.
40. Атамась Е.В. Экосистемные услуги ООПТ республики Алтай. – В кн.: Редакционная коллегия: КН Бабичев (отв. ред.), ИВ Самаркина, ТА Мясникова, АА Тамов, МВ Терешина, АВ Родин, ЕВ Илясова, ЕМ Крылова, КВ Гетманцев (ред.). – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2021. – С. 67.
41. Медведева О.Е. Методология оценки стоимости зеленых насаждений и их экосистемных услуг для принятия управленческих решенийв мегаполисе. – Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2025. – № 11(290). – С. 19-33. – DOI: 10.63257/2072-4098.2025.290.11.001.

References

1. Daily G.C. (Ed.) Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. Washington, D.C.: Island Press, 1997.
2. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature. 1997; 387 (6630): 253–260. – DOI: https://doi.org/10.1038/387253a0.
3. Millennium Ecosystem Assessment (MEA). Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment. Washington, D.C.: Island Press, 2005.
4. Haines-Young R., Potschin M.B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4. – 2013. – URL: https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/09/CICES-V4_Final_26092012.pdf (дата обращения: 24.03.2025).
5. Díaz S., Pascual U., Stenseke M., Martín-López B., Watson R.T., Molnár Z., Hill R., Chan K.M.A., Baste I.A., Brauman K.A., Polasky S., Church A., Lonsdale M., Larigauderie A., Leadley P.W., van Oudenhoven A.P.E., van der Plaat F., Schröter M., Lavorel S., Aumeeruddy-Thomas Y., Bukvareva E., Davies K., Demissew S., Erpul G., Failler P., Guerra C.A., Hewitt C.L., Keune H., Lindley S., Shirayama Y. Assessing nature's contributions to people. Science. 2018; 359 (6373): 270-272. – DOI: https://doi.org/10.1126/science.aap8826.
6. Burkhard B., Kroll F., Nedkov S., Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators. 2012; 21: 17-29. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.06.019
7. Burkhard B., Petrosillo I., Costanza R. Ecosystem services – Bridging ecology, economy and social sciences. Ecological Complexity. 2010; 7 (3): 257-259. – doi:10.1016/j.ecocom.2010.07.001
8. Rau A.-L., Unger B., Schröter M. Temporal dynamics of ecosystem services. Ecological Economics. 2018; 151: 122-130. – DOI:10.1016/j.ecolecon.2018.05.009 Bennett E.M., Peterson G.D., Gordon L.J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecology Letters. 2009; 12 (12): 1394-1404. – DOI: https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x.

9. Schröter M., van der Zanden E.H., van Oudenhoven A.P.E., Remme R.P., Serna-Chavez H.M., de Groot R.S., Opdam P. Ecosystem Services as a Contested Concept: A Synthesis of Critique and Counter-Arguments. Conservation Letters. 2014; 7 (6): 514-523. – DOI: 10.1111/conl.12091
10. Silvertown J. Have ecosystem services been oversold? Trends in Ecology & Evolution. 2015; 30 (11): 641-648. – DOI: 10.1016/j.tree.2015.08.007
11. Wunder S. Payments for environmental services: Some nuts and bolts. CIFOR Occasional Paper No. 42. – Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2005. – URL: https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-42.pdf
12. Wunder S. Revisiting the concept of payments for environmental services. Ecological Economics. 2015; 117: 234-243. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.03.016.
13. Bukvareva E. N., Zamolodchikov D. G. (eds.) Ekosistemnye uslugi Rossii: prototip natsional'nogo doklada. T.1. Uslugi nazemnykh ekosistem. [Ecosystem Services of Russia: Prototype of the National Report. Vol.1. Terrestrial Ecosystem Services]. Moscow: Izd-vo Tsentra okhrany dikoy prirody, 2016. 148 p. (In Russ.). ISBN 978-5-93699-080-9.
14. Wang L., Zheng H., Chen Y., Ouyang Z., Hu X. Systematic review of ecosystem services flow measurement: Main concepts, methods, applications and future directions. Ecosystem Services. 2022; 58: 101479. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101479.
15. Assis J.C., Hohlenwerger C., Metzger J.P., Rhodes J.R., Duarte G.T., da Silva R.A., ... & Ribeiro M.C. Linking landscape structure and ecosystem service flow. Ecosystem Services. 2023; 62: 101535. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101535.
16. Felipe-Lucia M.R., Guerrero A.M., Alexander S.M., Ashander J., Baggio J.A., Barnes M.L., ... & Dee L.E. Conceptualizing ecosystem services using social–ecological networks. Trends in Ecology & Evolution. 2022; 37 (3): 211-222. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.11.007.
17. Roces-Díaz J.V., Santín C., Martínez-Vilalta J., Doerr S.H. A global synthesis of fire effects on ecosystem services of forests and woodlands. Frontiers in Ecology and the Environment. 2022; 20 (3): 170-178. – DOI: https://doi.org/10.1002/fee.2450.
18. Cheng X., Van Damme S., Li L., Uyttenhove P. Evaluation of cultural ecosystem services: A review of methods. Ecosystem Services. 2019; 37: 100925. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100925.
19. Garcia-Pardo K.A., Moreno-Rangel D., Dominguez-Amarillo S., Garcia-Chavez J.R. Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation: A review of the methods applied. Urban Forestry & Urban Greening. 2022; 74: 127636. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127636.
20. Wu L., Fan F. Assessment of ecosystem services in new perspective: A comprehensive ecosystem service index (CESI) as a proxy to integrate multiple ecosystem services. Ecological Indicators. 2022; 138: 108800. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108800.
21. Baskent E.Z. Characterizing and assessing key ecosystem services in a representative forest ecosystem in Turkey. Ecological Informatics. 2023; 74: 101993. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.101993.
22. Schmidt S., Albert C. Enhancing multiple ecosystem services: Nature-based measures outperform technical interventions in river management. Ecosystem Services. 2025;76: 101795. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101795.
23. Acharya R.P., Maraseni T., Cockfield G. Global trend of forest ecosystem services valuation–An analysis of publications. Ecosystem Services. 2019; 39: 100979. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979.
24. Koshkina N. Ekosistemnye uslugi i opyt ikh ekonomicheskikh otsenok: issledovaniya idut v raznykh stranakh ne odno desyatiletie. [Ecosystem services and the experience of their economic evaluation: research has been going on in different countries for more than a decade]. InfraGreen. 02 декабря 2025. (In Russ.).

URL: https://infragreen.ru/ekosistiemnyie-uslughi-i-opyt-ikh-ekonomichieskikh-otsienok-issliedovaniia-idut-v-raznykh-stranakh-nie-odno-diesiatilietiie/ (дата обращения: 02.12.2025).

25. Konstantinova A., Dushkova D., Matasov V., Gaeva D., Dovletyarova E., Taherkhan M. Analiz rossiyskikh issledovaniy gorodskikh ekosistemnykh uslug. [Analysis of Russian research on urban ecosystem services]. Ecogorod.ru. 03 февраля 2025. (In Russ.). URL: https://ecourbanist.ru/ecosystem-serv/analiz-rossijskih-issledovanij-gorodskih-ekosistemnyh-uslug/ (дата обращения: 02.12.2025).
26. Ansong M., Gissi E., Calado H. The economic values of global forest ecosystem services: A meta-analysis. Ecological Economics. 2021; 189: 107145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107145.
27. Jumiyati S. Economic Valuation of Forest Ecosystem Services: Methods, Applications, and Policy Implications. Forestry: Jurnal Ilmu Kehutanan. 2025; 2 (1): 1-10. DOI: https://doi.org/10.25299/forestry.2025.vol2(1).25136.
28. Kubo M., A T. Assessment of forest ecosystem service research trends and methodological approaches at global level: a meta-analysis. Environmental Systems Research. 2019; 8 (1): 22. DOI: https://doi.org/10.1186/s40068-019-0142-4.
29. Kuzmichev E. P., Trushina I. G., Trushina N. I. Osnovnye metodicheskie podkhody k otsenke ekosistemnykh uslug v zarubezhnykh stranakh: obzor problemy. [Key methodological approaches to ecosystem services assessment in foreign countries: a review of the problem]. Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin. 2021; 25(1): 10-18. (In Russ.). URL: https://lesvestnik.vglta.ru/archive/2021/Lesvestnik_25_1_2021.pdf.
30. Bobylev S. N., Goryacheva A. A. Identifikatsiya i otsenka ekosistemnykh uslug: mezhdunarodnyy kontekst. [Identification and assessment of ecosystem services: international context]. Vestnik mezhdunarodnykh organizatsiy: obrazovanie, nauka, novaya ekonomika = Bulletin of International Organizations: Education, Science, New Economy. 2019; 14(1): 225-236. (In Russ.). URL: https://iorj.hse.ru/article/view/11263.
31. Rozenberg A. G. Istoki sovremennoy istorii ekosistemnykh uslug. [Origins of the modern history of ecosystem services]. Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii = Samara Luka: Problems of Regional and Global Ecology. 2017; 26(1): 5-14. (In Russ.). URL: https://www.ssc.smr.ru/media/journals/samluka/2017/1_2017.pdf.
32. Vasilenko N. V. Ekosistemnye uslugi: sushchnost', vidy i riski. [Ecosystem services: essence, types and risks]. In: Aktual'nye problemy razvitiya khozyaystvuyushchikh sub"ektov, territoriy i sistem regional'nogo i munitsipal'nogo upravleniya. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta; 2019. P. 75-77. (In Russ.).
33. Solovyeva S. V. Ekonomicheskiy i biologicheskiy instrumentariy otsenki ekosistemnykh uslug Rossii. [Economic and biological toolkit for assessing ecosystem services in Russia]. In: Vozmozhnye stsenarii budushchego rossii i mira: mezhdistsiplinarnyy diskurs. Moscow: Tsifrovichok; 2020. P. 566-567. (In Russ.).
34. Neverov A. V., Bakhed Kh. A. B. Formirovanie kontseptual'nykh osnov postroeniya stoimostnogo ucheta ekosistemnykh uslug lesov. [Formation of conceptual foundations for constructing cost accounting for forest ecosystem services]. 2022. 15 p. (In Russ.). Rukopis' deponirovana v VINITI RAN № 125-V2022 ot 07.06.2022.
35. Gagarin Yu. N. Kontseptsiya proekta federal'nogo zakona «Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii». [The concept of the draft federal law "Forest Code of the Russian Federation"]. Voprosy lesnoy nauki = Issues of Forest Science. 2020; 3(3): 1-45. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-proekta-federalnogo-zakona-lesnoy-kodeks-rossiyskoy-federatsii.
36. Polyakov V. V. Platezhi za ekosistemnye uslugi kak instrument vosproizvodstva prirodno-resursnogo kapitala. [Payments for ecosystem services as a tool for the reproduction of natural resource capital]. Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy = Economics and Ecology of Territorial Entities. 2020; (3): 13-19. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/platezhi-za-ekosistemnye-uslugi-kak-instrument-vosproizvodstva-prirodno-resursnogo-kapitala.
37. Ramenskaya L. A. Primenenie kontseptsii ekosistem v ekonomiko-upravlencheskikh issledovaniyakh. [Application of the ecosystem concept in economic and managerial research]. Upravlenets = The Manager. 2020; 11(4): 18-27.

(In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kontseptsii-ekosistem-v-ekonomiko-upravlencheskih-issledovaniyah.

38. Yurak V. V., Ignat'eva M. N. Ekonomicheskaya otsenka: ot prirodnykh resursov do ekosistemnykh uslug. [Economic valuation: from natural resources to ecosystem services]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika = Moscow University Economics Bulletin. Series 6. Economics. 2022; (6): 65-99. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-otsenka-ot-prirodnyh-resursov-do-ekosistemnyh-uslug.
39. Vragova E. A. Issledovanie kontseptsii ekosistemnykh uslug i ikh ekonomicheskaya otsenka v tselyakh ustoychivogo razvitiya. [Research of the concept of ecosystem services and their economic assessment for sustainable development]. Aktual'nye issledovaniya = Current Research. 2022; (24)103: 82-88. (In Russ.). URL: https://apni.ru/article/4276-issledovanie-kontseptsii-ekosistemnikh-uslug[citation:1].
40. Atamas' E. V. Ekosistemnye uslugi OOPT respubliki Altay. [Ecosystem services of protected areas in the Altai Republic]. In: Redaktsionnaya kollegiya: Babichev K. N. (otv. red.), Samarkina I. V., Myasnikova T. A., Tamov A. A., Tereshina M. V., Rodin A. V., Ilyasova E. V., Krylova E. M., Getmantsev K. V. (red.). Barnaul: Izd-vo AltGU; 2021. P. 67. (In Russ.).
41. Medvedeva O. E. Metodologiya otsenki stoimosti zelenykh nasazhdeniy i ikh ekosistemnykh uslug dlya prinyatiya upravlencheskikh resheniy v megapolise. [Methodology for assessing the cost of green spaces and their ecosystem services for making management decisions in a metropolis]. Imushchestvennye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii = Property Relations in the Russian Federation. 2025; 11(290): 19-33. (In Russ.). DOI: 10.63257/2072-4098.2025.290.11.001.

Сведения об авторах

✉ *Яковенко Наталия Владимировна* – доктор географических наук, главный научный сотрудник дирекции НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: https://orcid.org/00000003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.

Старухина Екатерина Анатольевна – аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9652-8629, e-mail: katestarukhina15@gmail.com.

Варгузина Мануш Гагиковна – доцент кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0009-0001-6964-8564, e-mail: manushik017@mail.ru.

Нацентова Елизавета Андреевна – аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7500-0915, e-mail: nacentovaea@vglta.vrn.ru.

Волошина Ольга Васильевна – преподаватель кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6390-6518, e-mail: oly.v78@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Nataliya V. Yakovenko* – Dr. Sci. (Geogr.), Chief research officer of the division's Directorate of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.

Ekaterina A. Starukhina – Graduate student at the Department of Ecology, Forest Protection and Forest Hunting, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9652-8629, e-mail: katestarukhina15@gmail.com.

Manush G. Varguzina – Associate Professor of the Department of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6964-8564, e-mail: manushik017@mail.ru.

Elizaveta A. Natsentova – Graduate student at the Department of Ecology, Forest Protection and Forest Hunting, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7500-0915, e-mail: nacentovaea@vglta.vrn.ru.

Olga V. Voloshina - Lecturer at the Department of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6390-6518, e-mail: oly.v78@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2025 Том 15 № 4 (60)

Подписано в печать 23.12.2025. Формат 60×90 1/8.
Дата выхода в свет 24.12.2025. Цена 3 050 р.
Усл. печ. л. 67,0. Уч.-изд. л. 130,9. Тираж 1000 экз. Заказ 617

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8
телефон (473) 253-72-90, факс (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»
394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

FORESTRY ENGINEERING JOURNAL

Scientific journal

2025 Vol. 15 № 4 (60)

Signed to be published 23.12.2025. Format 60×90 1/8.
Publication date 24.12.2025. Price 3 050 rub.
Cond. print. sh. 67,0. Acc.-print. sh. 130,9. Printing 1000 copies. Order 617

Publisher: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov» (FSBEI HE «VSUFT»)

Publisher address: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»
Timiryazev str., 8, Voronezh 394087
phone (473) 253-72-90, fax (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Department of Operational Printing of the FSBEI HE «VSUFT»
Dokuchaev str., 10, Voronezh 394087