

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2026 Том 16 № 2 (62)

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 наук М. 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

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», 2026

FORESTRY ENGINEERING JOURNAL

Scientific Journal

2026 Vol. 16 № 2 (62)

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. Zamolodchikov D.G. (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)

Dr., 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. P. Tylek (Poland)

Dr. S.V. Rebko (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. Krokhovina

Typesetting

S.Yu. Krokhovina

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

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», 2026

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

Агадуллин Д.Р., Гурьев А.В., Лебедева О.П. Оценка способности к биодegradации в почве ячеек из целлюлозы, предназначенных для индустриального выращивания сеянцев	6
Артемikhина Е.А., Жила С.В., Данилюк Ю.В., Елисеев С.Г., Баяндин М.А. Изменение химического состава древесины сухостойной пихты сибирской (<i>Abies sibirica</i> Ledeb.) разной давности гибели, нарушенной полиграфом уссурийским (<i>Polygraphus proximus</i> Blandford), по данным ИК-Фурье спектроскопии	18
Ермакова М.В. Динамика формирования структуры и взаимосвязи основных показателей лесных культур сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.) на вырубке сосняка ягодникового Среднего Урала	33
Иванчина Л.А., Макурин Д.В., Савостин Е.С., Деменев А.Д., Максимович Н.Г. Оценка темпов естественного возобновления вырубок усохших ельников с помощью данных дистанционного зондирования	50
Лавренов М.А., Котов А.А. Исследование способов снижения влияния силы поверхностного натяжения при флотации семян хвойных пород	65
Попов О.С., Новосёлов А.С., Дружинин Ф.Н. Комплексная оценка влияния гидролесомелиорации и лесоводственных мероприятий на продуктивность сосны обыкновенной (<i>Pinus Sylvestris</i> L.) в условиях Вологодской области	82
Рунова Е.М., Пузанова О.А., Новоселова О.И. Оценка стабильности развития тополя бальзамического (<i>Populus balsamifera</i> L.) в условиях массового поражения листовой ржавчиной	100

CONTENTS NATURAL SCIENCES AND FOREST

Agadullin D.R., Guriev A.V., Lebedeva O.P. Assessment of the biodegradation capacity in the soil of cellulose cells intended for industrial cultivation of seedlings	6
Artemikhina E.A., Zhila S.V., Danilyuk Yu. V., Eliseev S.G., Bayandin M.A. Using FTIR spectroscopy to detail wood chemistry of Ussuri bark beetle (<i>Polygraphus proximus</i> Blandford) - invaded Siberian fir (<i>Abies sibirica</i> Ledeb.) trees	18
Ermakova M.V. Dynamics of the formation of the structure and the relationship of the main indicators of pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) forest crops in the felling of a berry pine forest in the Middle Urals	33
Ivanchina L.A., Makurin D.V., Savostin E.S., Demenev A.D., Maksimovich N.G. Assessment of Natural Regeneration Rates in Logged Dried-Up Spruce Forests Using Remote Sensing Data	50
Lavrenov M.A., Kotov A.A. Study of methods to reduce the influence of surface tension force during flotation of coniferous seeds	65
Popov O.S., Novoselov A.S., Druzhinin F.N. Comprehensive Assessment of the Influence of Hydroforestry Reclamation and Silvicultural Measures on the Productivity of Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) under the Conditions of the Vologda Region	82
Runova E.M., Puzanova O.A., Novoselova O.I. Evaluation of the stability of the balsam poplar (<i>Populus balsamifera</i> L.) under conditions of mass leaf rust infestation	100

Страдаускене С.Р., Сунгурова Н.Р., Куприянова А.Г., Макаров С.С., Шаренкова М.Г., Лазарева И.В. Биоразнообразие дендрофлоры на объектах озеленения ограниченного пользования Яковенко Н.В., Подласкина С.Ю.	118	Strazdauskene S.R., Sungurova N.R., Kupriyanova A.G., Makarov S.S., Sharenkova M.G., Lazareva I.V. The biodiversity of dendroflora in limited-use landscaping facilities Yakovenko N.V., Podlaskina S.Yu.	118
Критерии отбора древесно- кустарниковых растений для озеленения теннисных академий в условиях субтропического климата (на примере Южного берега Крыма) Яковенко Н.В., Турчанинова Е.В.	135	Criteria for selecting woody and shrubby plants for landscaping tennis academies under subtropical climate (exemplified by the Southern Coast of Crimea) Yakovenko N.V., Turchaninova E.V.	135
Приуроченность совообразных (<i>Strigiformes</i>) к лесным насаждениям и гнездовая пригодность микрофрагментов в агроландшафтах Воронежской области ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ	155	Association of owls (<i>Strigiformes</i>) with forest stands and nesting suitability of micro-fragments in agricultural landscapes of Voronezh Oblast TECHNOLOGIES. MACHINERY AND EQUIPMENT	155
Бухтояров Л.Д. Модальный анализ колебаний ветвей древесной растительности с учетом динамики режущего ротора	171	Bukhtoyarov L.D. Modal analysis of oscillations of tree vegetation branches taking into account the dynamics of the cutting rotor	171
Голякевич С. А. Оценка эксплуатационной эффективности харвестеров с применением энергетической концепции Посыпанов С.В., Калитин Н.С. Оценка гидродинамического влияния корпуса буксировочного лесотранспортного модуля на условия работы движителей	183	Golyakevich S.A. Evaluating the operational efficiency of harvesters using an energy-based approach Posypanov S.V., Kalitin N.S. Evaluation of the hydrodynamic Influence of the Hull of a towing timber transport Module on the operating Conditions of the Propellers	183
Сиваков В.В., Заикин А.Н., Зеликов В.А. Обоснование параметров и разработка конструкций навесных трелёвочных тележек для тракторов общего назначения Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Сибиряткин Е.В., Тихонов Е.А., Перфильев П.Н. Моделирование процесса образования колеи при последовательном взаимодействии колес форвардера с твердыми препятствиями на трелевочном волокне с учетом влажности почвогрунта	204	Sivakov V.V., Zaikin A.N., Zelikov V.A. Justification of parameters and development of designs for mounted skidding carts for general-purpose tractors Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Sibiryatkin E. V., Tikhonov E.A., Perfiliev P.N. Modeling the process of rut formation during sequential interaction of forwarder wheels with solid obstacles on a skid trail taking into account soil moisture	204
	217		217
	234		234

**Шапиро В.Я., Григорьев И.В.,
Рыжов Я.А., Тихонов Е.А.,
Перфильев П.Н.**

Оценка работоспособности
трелевочного волока на склоне с
учетом армирующего влияния
насыщенного корнями слоя
почвогрунта при взаимодействии
колесной лесной машины

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

**Литвинова Н.А., Изотова А.Г.,
Гаврилюк Е.С., Бурцев Д.С.**
Анализ соответствия региональных
лесных планов целям федеральной
стратегии развития лесного комплекса
России (на примере субъектов СЗФО)

Мазурик Д.И., Дягилева А.Б.
Механизм формирования сточных вод
с искусственных зеленых площадок
урбанизированных территорий

ЭКОЛОГИЯ

**Шарафутдинов Р. А., Пыжев А. И.,
Гордеев Р. В., Митев А. Р.**
Совершенствование механизма
рекультивации нарушенных в
результате геологического изучения
недр и добычи россыпного золота
лесных земель

**Shapiro V.Ya., Grigorev I.V.,
Ryzhov Ya.A., Tikhonov E.A.,
Perfiliev P.N.**

Assessment of the performance
of a skid trail on a slope
considering the reinforcing effect
of a root-saturated soil layer under
the interaction of the wheels
of a forest machine

NATURE MANAGEMENT

**Litvinova N.A., Izotova A.G.,
Gavriluk E.S., Burtsev D.S.**
Analysis of the compliance
of regional forest plans with the
goals of the federal strategy for
the development of Russia's forest
complex (using the example of
the Northwestern Federal District)

Mazurik D.I., Dyagileva A.B.
The mechanism of wastewater
formation from artificial green
areas in urbanized territories

ECOLOGY

**Sharafutdinov R.A., Pyzhev
A.I., Gordeev R.V., Mitev A.R.**
Refining the reclamation process
for forest lands damaged by
geological exploration and mining
of placer gold



Оценка способности к биодegradации в почве ячеек из целлюлозы, предназначенных для индустриального выращивания сеянцев

Данил Р. Агадуллин¹✉, agadullindan@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>

Александр В. Гурьев¹, a.guriev@narfu.ru,

Ольга П. Лебедева¹, o.lebedeva@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

¹ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация

Исследование посвящено оценке скорости и степени биодegradации в почве целлюлозных ячеек, предназначенных для индустриального выращивания сеянцев, как экологичной альтернативы пластиковым кассетам. В эксперименте использовались два типа композиций на основе целлюлозных волокон, заглублённые в трёх типах почвенных субстратов (почва из-под ельника черничного, компост, торфоземельная смесь). Для определения потери массы образцов применялся гравиметрический метод. Установлено, что степень разложения материалов составила в среднем 87 % и 84 % для двух композиций соответственно. На основе полученных данных прогнозируемое время полного разложения оценивается в 57–59 суток. Наибольшая интенсивность дegradации зафиксирована в торфоземельной смеси. Статистический анализ подтвердил значимое влияние типа целлюлозной композиции на скорость биодegradации. В ходе эксперимента с использованием дождевых червей рода *Allolobophora* в качестве биоиндикаторов не выявлено визуально наблюдаемых признаков негативного воздействия разлагающихся материалов на почвенную фауну. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения биоразлагаемых целлюлозных кассет для лесовосстановления как способа снижения пластиковой нагрузки на экосистемы.

Ключевые слова: биоразлагаемые кассеты, целлюлозные материалы, лесовосстановление, почвенные субстраты, *toulded pulp*

Финансирование: исследование выполнено за счет средств Программы развития САФУ на 2021–2035 гг., договор Д-468.2025.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Агадуллин, Д. Р. Оценка способности к биодegradации в почве ячеек из целлюлозы, предназначенных для индустриального выращивания сеянцев / Д. Р. Агадуллин, А. В. Гурьев, О. П. Лебедева // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 6–17. – Библиогр.: с. 14–16 (20 назв.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/1>.

Поступила 25.02.2026. Пересмотрена 24.03. 2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Article

Assessment of the biodegradation capacity in the soil of cellulose cells intended for industrial cultivation of seedlings

Danil R. Agadullin¹✉, agadullindan@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>

Alexander V. Guriev¹, a.guriev@narfu.ru,

Olga P. Lebedeva¹, o.lebedeva@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nab. Severnaya Dvina, 17, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract

This study assessed the rate and extent of biodegradation in soil of cellulose cells intended for industrial seedling cultivation, as an environmentally friendly alternative to plastic cassettes. The experiment utilized two types of cellulose fiber-based compositions embedded in three types of soil substrates (soil from a blueberry spruce forest, compost, and a peat-soil mixture). A gravimetric method was used to determine sample mass loss. The average decomposition rate of the materials was 87 % and 84 % for the two compositions, respectively. Based on the data obtained, the predicted time for complete decomposition is estimated at 57–59 days. The highest degradation rate was recorded in the peat-soil mixture. Statistical analysis confirmed a significant impact of the cellulose composition type on the rate of biodegradation. An experiment using earthworms of the genus *Allolobophora* as bioindicators revealed no visually observable negative impacts of decomposing materials on soil fauna. The results demonstrate the potential of using biodegradable cellulose cassettes for reforestation as a way to reduce the plastic load on ecosystems.

Keywords: *biodegradable cassettes, cellulosic materials, reforestation, soil substrates, molded pulp*

Financing: the study was carried out at the expense of the NARFU Development Program for 2021-2035, contract D-468.2025.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Agadullin D. R., Guriev A. V., Lebedeva O. P. (2026). Assessment of the biodegradation capacity in the soil of cellulose cells intended for industrial cultivation of seedlings. Forestry Engineering journal, Vol. 62, No. 2 (62), pp. 6-17 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/1>.

Received 25.02.2026.

Revised 24.03. 2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Искусственное лесовосстановление, являющееся ключевым инструментом воспроизводства ценных лесных ресурсов, в значительной степени зависит от качества посадочного материала. Согласно правилам восстановления лесов¹ в Архангельской области используются семена хвойных пород (сосна и ель), а с 1 марта 2025 года пункт 5 Правил предусматривает, что не менее 30 % площадей искусственного и комбинированного лесовосстановления выполняется посадкой семян и (или) саженцев с закрытой корневой системой. Широко распространенная технология выращивания семян в пластиковых кассетах РКЛ-81 и 100 марки Plantek или ВВС приводит к образованию трудноперерабатываемых отходов, поскольку после эксплуатации кассеты направляются на полигоны, становясь источником долговременного загрязнения. Накопление устойчивых к деградации синтетических полимеров в экосистемах представляет собой одну из наиболее острых глобальных экологических проблем [1, 2]. Особую опасность представляет загрязнение почв, где в результате накопления «микропластика» нарушаются физико-химические свойства грунта, ухудшается его структура, что в совокупности негативно влияет на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов [3]. В связи с этим возрастает интерес к альтернативным вариантам, способным устранить озвученную проблему в виде пластикового загрязнения.

Перспективной альтернативой являются биоразлагаемые кассеты (рис. 1), изготовленные по технологии moulded pulp (формования изделий из целлюлозной суспензии) [4, 5]. Основным сырьём, для изготовления кассет служат целлюлозные волокна (первичные и вторичные). В настоящее время в качестве сырья рассматривается побочный продукт (отход) в виде сучковой массы целлюлозно-бумажного производства, который в процессе сульфатной варки не разделился на отдельные волокна.

Главное преимущество кассет заключается в способности к биodeградации в почве, что не только решает проблему загрязнения, но и потенциально может упростить технологический процесс лесовосстановления путём высадки семян непосредственно в биоразлагаемых ячейках. Объем контейнерного субстрата, помещённого в ячейку, полностью соответствует параметрам стандартизованных пластиковых аналогов, что обеспечивает выращивание семян согласно существующим нормативным требованиям. Основная гипотеза данного исследования заключается в том, что замена традиционных пластиковых кассет на биоразлагаемые позволяет сократить использование пластика.

Пилотные опыты промышленного применения таких кассет ведутся на базе лесного селекционно-семеноводческого центра Архангельского ЦБК в г. Новодвинске. Однако для их широкого внедрения в практику искусственного лесовосстановления требуются дополнительные

¹Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта

лесовосстановления и внесения в него изменений. Приказ Минприроды от 29.12.2021 № 1024.

исследования, в первую очередь, направленные на оценку скорости и полноты биodeградации материалов кассет в конкретных почвенно-климатических условиях региона.



Рисунок 1. Внешний вид биоразлагаемой кассеты, изготовленной по технологии moulded pulp

Figure 1. Appearance of a biodegradable cassette manufactured using molded pulp technology

Источник: собственная фотография авторов

Source: the authors' own photograph

Следует также отметить, что сфера применения биоразлагаемых кассет не ограничивается промышленным лесовосстановлением. Данная технология является актуальной для частного садоводства, питомниководства декоративных культур и агропроизводственных комплексов, где также растет спрос на экологичные и удобные решения для выращивания растений.

Разложение целлюлозных волокон на составляющие представляет собой сложный микробиологический процесс, осуществляемый бактериями и грибами, которые вырабатывают специальные ферменты для их деградации [6, 7]. Процесс включает стадии: деполимеризации, ассимиляции образовавшихся мономеров и олигомеров микробными клетками, а также последующей минерализации [8]. Лигнин, являясь гетерогенным ароматическим полимером, демонстрирует значительно более высокую устойчивость к микробной деградации по сравнению с целлюлозой, что подтверждается исследованиями, показывающими прямую зависимость скорости биodeградации от содержания лигнина в материале [8-10].

На скорость биodeградации целлюлозных материалов влияет комплекс факторов, включая состав целлюлозных волокон [8], массу 1 м² материала [11,12], влажность почвы [12], температуру [13], аэрацию почвы [14], pH почвы [14] и пр. При этом, наличие поверхностных покрытий в составе материала приводит к замедлению биodeградации [15, 16]. N.B. Erdal и M. Hakkarainen (2022) [14] отмечают, что различные виды целлюлозной продукции (бумаги и картона)

демонстрируют резко различную скорость биоразложения в контролируемых условиях. Несмотря на значительное количество научных работ, посвященных биodeградации целлюлозных материалов, специализированные изделия, изготовленные по технологии moulded pulp, остаются с этой точки зрения недостаточно изученными.

Целью настоящего исследования является определение скорости и степени разложения целлюлозных ячеек для лесовосстановления в различных почвенных условиях.

Объекты и методы исследования

Климатические условия Архангельской области относятся к умеренному поясу с морским влиянием. Зимний период характеризуется умеренно низкими температурами, а летний период – умеренно теплыми температурами. Средняя температура воздуха в январе составляет около -12...-14 °C, в июле – 16...17 °C. Вегетационный период проходит при пониженных температурах воздуха и продолжается около 130 дней: с начала-конца мая и до конца сентября-начала октября.

Исследование проводили в теплице учебно-опытного участка САФУ имени М.В. Ломоносова в течение вегетационного периода. Оценку биodeградации целлюлозных материалов проводили гравиметрическим методом по потере массы образцов после их экспозиции в почве. Методика основана на модификации подхода, используемого в методе аппликационного определения дыхания грунтов [17] в вегетационных сосудах. Отличие заключается в том, что мы не рассматриваем микробиологическую активность грунта, а прямая цель опыта в оценке степени деструкции самого целлюлозного материала. Оптимальные условия для разложения целлюлозы обычно возникают при температуре 25–35 °C и влажности около 60 % от максимальной влагоёмкости [18].

Вегетационный сосуд представляет собой сетчатый ящик, который моделирует шаг посадки 0,7 м и позволяет создать условие, которое обеспечивает полное нахождение образцов в пределах стандартного корнеобитаемого слоя (0...20 см). На такое размещение в полевых условиях приходится 1 целлюлозная ячейка. Почвенный субстрат использовался, с различной исходной микробиологической активностью: почва из-под ельника черничного, компост и торфоземельная смесь, применяемая в городском озеленении с основой из торфа (70 %). Такой выбор был обусловлен следующими факторами. Почва из-под ельника черничного представляет собой наиболее распространенный тип лесных почв в регионе исследования. Компост был включен в эксперимент как широко используемый субстрат в частном садоводстве, что позволяет оценить потенциальное применение биоразлагаемых кассет не только

Лесотехнический журнал 2/2026

в целях лесовосстановления, но и в условиях антропогенных ландшафтов. Торфоземельная смесь была выбрана как показательный тип почвенного субстрата, используемый при озеленении городских территорий, что расширяет потенциальную область применения разрабатываемых кассет.

Кассеты получали по технологии moulded pulp путём их формования из волокнистой суспензии концентрацией 0,3 % с последующим термоформованием (горячим прессованием) до получения готовых изделий. Технологический процесс создания формованных кассет из растительных волокон включает подготовку сырья (разволокнение, очистка, гидромеханическая обработка в конических/дисковых мельницах) и формование (вакуумное обезвоживание кассет до 35 % влаги) с последующей сушкой до 4–8 % влаги. Получаемые кассеты, как их аналоги в виде горшков, обладают высокой биоразлагаемостью, водо- и воздухопроницаемостью, позволяя корням проникать через стенки и высаживать саженцы без извлечения, повышая производительность труда за счет исключения операций по сбору, отбору, хранению, очистке и стерилизации пластиковых аналогов [5, 19].

В качестве образцов для исследования биodeградации использованы два типа целлюлозных композиций: первая – 70 % лиственной и 30 % хвойной сучковой массы; вторая – 80 % лиственной полуцеллюлозы (ПЦ) и 20 %

хвойной целлюлозы высокого выхода (ЦВВ). Технологический режим изготовления подбирался индивидуально для каждого состава на установке прототипирования. Для композиции 1 время набора и обезвоживания волокна составило 0,8–1,0 с и 35–45 с соответственно; для композиции 2 — 3,6–3,9 с и 50–60 с. Сушка изделий осуществлялась методом термоформования при температурах 180–190 °С в течение 300–400 с.

Для моделирования деградации целлюлозных кассет (4,0–4,8 г) в почве изготовили 24 фрагмента массой 0,12–0,14 г (3 % целой кассеты, 2×3 см). Каждый фрагмент подвергался кондиционированию согласно ГОСТ 13523-78 (температура 23 ± 1 °С, относительная влажность 50 ± 2 %) с последующим взвешиванием для определения его массы, нумеровался и фиксировался при помощи скобы на поликарбонатных аппликационных пластинах (рис. 2, а). Пластины установлены в почве таким образом, что их верхняя грань находилась на глубине 3...5 см от поверхности почвы (рис. 2, б). В течение всего эксперимента влажность почв поддерживалась на уровне 60 % от полной влагоемкости. В течение опыта каждые 10 суток аппликационные пластины раскапывались, но не вынимались полностью т.к. это могло привести к нарушению почвенного биома. Пластины осматривались на степень деградации целлюлозных материалов и при достижении данного показателя более 80 %, все пластины извлекались для измерений.



а | а



б | б

Рисунок 2. Аппликационные пластины с образцами (а) и их установка в почву (б)

Figure 2. Application plates with samples (a) and their installation in the soil (b)

Источник: собственные фотографии авторов

Source: the authors' own photographs



Рисунок 3. Аппликационная пластина спустя 50 дней эксперимента

Figure 3. Application plate after 50 days of the experiment

Источник: собственная фотография авторов

Source: the authors' own photograph

После завершения экспозиции в почве образцы повторно кондиционировались в тех же условиях и затем взвешивались. После кондиционирования остатки почвы были аккуратно удалены с поверхности образцов кистью для последующего анализа. Таким образом исключается влияние изменения влажности образцов и наличие остатков почвы на результаты гравиметрического анализа.

Отдельное внимание было уделено оценке экологической безопасности применения ячеек, т. к. при варке целлюлозы используется щелочь. Кислотность волокнистой суспензии готовой ячейки равен 7,8, в связи с этим, в качестве биоиндикатора негативного воздействия на почвенную фауну были использованы дождевые черви рода *Allolobophora* [20]. Применение сетчатого ящика позволяло не препятствовать проникновению дождевых червей в используемые почвенные среды, поэтому оценка экологической безопасности оценивалась по наличию червей.

Все полученные результаты подвергались статистическому анализу с использованием стандартного программного обеспечения Microsoft Office Excel 2021, StatPlus.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе наблюдений в первые 20 суток изменений не наблюдалось, но единично замечены

дождевые черви в каждом ящике. С 20 суток наблюдались начальные признаки изменения структуры поверхности, выражающиеся в её незначительном размягчении и повышении шероховатости, но при этом не было выявлено существенных изменений в образцах. Активное разложение образцов началось с 30 по 50 сутки. К концу опыта (50-е сутки) отмечалась значительная биodeградация образцов, отличающаяся от их первоначального состояния: кромки образцов, становились менее чёткими, поверхность приобретала более рыхлый и неоднородный характер (рис. 3). На этом этапе все пластины были извлечены из почв. Гравиметрический анализ, проведенный после экспозиции образцов в почве, выявил высокую степень биodeградации целлюлозных материалов (рис. 4). Данные представлены в таблице 1. Усредненная степень разложения образцов из композиции 1 составила 87 %, тогда как для композиции 2 этот показатель достиг 84 %. Наибольшая степень деструкции для обоих типов материалов наблюдалась в торфоземельной смеси (94 % и 95 % соответственно), тогда как наименьшие значения зафиксированы для композиции 1 в компосте (80 %) и для композиции 2 в почве из-под ельника черничного (69 %).

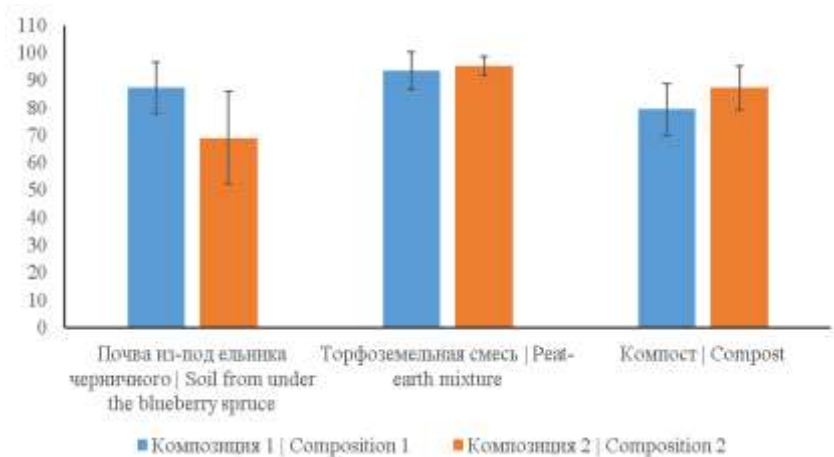


Рисунок 4. Средняя доля разложения целлюлозных композиций в различных почвенных субстратах после 50 суток экспозиции

Figure 4. Average proportion of decomposition of cellulose composites in various soil substrates after 50 days of exposure

Источник: собственные исследования авторов
Source: authors' own research

Для оценки скорости биodeградации провели расчет описательной статистики данных по доле разложения образцов. Полученные уравнения регрессии, демонстрируют, что среднее время, необходимое для полного разложения образцов, составляет 57 суток для композиции 1 и 59 суток для композиции 2. Следует учитывать, что полученные уравнения регрессии являются упрощёнными вследствие ограничения числом экспериментальных точек. В связи с этим прогноз полного разложения следует рассматривать как ориентировочный.

Полученные данные в целом коррелируют с данными JP. Juanga-Labayen, и Q. Yuan (2021) [19] в которых авторы отмечают, что биоразлагаемые горшки, применяемые для рассады, разложились более чем на 50 % в течение 45 дней эксперимента. Эти результаты подтверждают возможность полной биodeградации изделий данного назначения. Прямое сопоставление с полученными в настоящей работе результатами затруднено в связи с различиями в составе материалов, объемами изделий и условиями их эксплуатации.

Таблица 1

Статистические характеристики потери по доле разложения целлюлозных композиций

Table 1

Statistical characteristics of the loss by percentage of decomposition of cellulose compositions

Композиция 1 Composition 1			
Показатели Indicators	Вид субстрата Type of substrate		
	Почва из-под ельника черничного Soil from under the blueberry spruce	Компост Compost	Торфоземельная смесь Peat-earth mixture
Средняя доля разложения, % Average decomposition rate, %	87	80	94
Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	0,09	0,09	0,07
Коэффициент вариации, % Ratio variations, %	11	12	7
Стандартная ошибка среднего Standard error of the average	0,03	0,03	0,02
Медиана The median	0,91	0,81	0,95

Уравнение регрессии The regression equation	$y = -1,7862x + 100$	$y = -1,6168x + 100$	$y = -1,9125x + 100$
Расчетный период разложения ячеек, дней Estimated period of cell decomposition, days	56	62	52
Композиция 2 Composition 2			
Средняя доля разложения, % Average decomposition rate, %	69	87	95
Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	0,17	0,08	0,04
Коэффициент вариации, % Ratio variations, %	24	9	3
Стандартная ошибка среднего Standard error of the average	0,05	0,02	0,01
Медиана The median	0,72	0,86	0,96
Уравнение регрессии The regression equation	$y = -1,4313x + 100$	$y = -1,7903x + 100$	$y = -1,9463x + 100$
Расчетный период разложения ячеек, дней Estimated period of cell decomposition, days	70	56	51

Примечание: x – период разложения, день; y – относительная масса образцов, %

Note: x – decomposition period, day; y – relative mass of the samples, %

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ данных показал:

- для композиции 1 средние значения доли разложения демонстрируют близкий уровень биоразложения в разных типах почв (80-94 %), что подтверждается низкими коэффициентами вариации (7-12 %) и незначительным разбросом данных вокруг среднего (стандартная ошибка 0,02-0,03);

- для композиции 2 наблюдается большая вариабельность результатов, особенно в почве из-под ельника черничного (коэффициент вариации 24 %), тогда как в других типах почв данные более однородны (коэффициент вариации 3-9 %).

Различия в скорости биodeградации в исследованных субстратах могут быть обусловлены их физико-химическими и биологическими характеристиками. Торфоземельная смесь, как правило, отличается более высокой влагоёмкостью и аэрацией, а также повышенным содержанием органического вещества, что создаёт благоприятные условия для развития микробиоты, участвующей в разложении целлюлозы. В компосте высокая скорость разложения может быть связана с активной

микробиологической деятельностью. Почва из-под ельника черничного характеризуется более кислой средой и меньшей доступностью легкоразлагаемых микроорганизмов, что может замедлять процесс деструкции целлюлозных материалов.

Полученные результаты по биodeградации образцов в целом согласуются с литературными данными, согласно которым целлюлозные материалы, включая бумагу и картон, характеризуются высокой способностью к биodeградации [6, 7, 12, 14, 15, 18, 19].

Для статистической оценки полученных результатов был применен t-критерий Стьюдента. Сравнение степени деградации двух типов материалов внутри каждого типа почвы показало наличие статистически значимых различий ($p < 0,05$) во всех трех случаях. Данные представлены в таблице 2. Это подтверждает, что тип целлюлозной композиции оказывает значимое влияние на скорость ее биodeградации в конкретном почвенном субстрате. Это указывает на различия в структуре и составе исследуемых материалов.

Таблица 2

Достоверность различий степени деградации материалов в зависимости от почвенного субстрата

Table 2

Reliability of differences in the degree of degradation of materials depending on the soil substrate

Вид субстрата Substrate type	Число степеней свободы Number of degrees of freedom	Значение критического t-критерия при $p < 0,05$ The value of the critical t-test at $p < 0,05$	Критерий Стьюдента (рассчитанный) Student's t-test (calculated)

Почва из-под ельника черничного Soil from under the blueberry spruce	24	2,064	6,06
Торфоземельная смесь Peat-earth mixture	25	2,060	8,39
Компост Compost	24	2,064	3,48

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Сравнительный анализ деградации одного типа материала в разных типах почв выявил более сложную зависимость. Значения представлены в таблице 3. Для образцов из композиции 1 не обнаружено статистически значимой разницы между степенью разложения в почве из-под ельника черничного и в компосте, а также между почвой из-

под ельника черничного и торфоземельной смесью. В то же время различия между степенью разложения в торфоземельной смеси и компосте являются статистически значимыми. Для композиции 2 статистически значимые различия были выявлены только при сравнении степени деградации в почве из-под ельника черничного и в компосте.

Таблица 3

Достоверность различий степени деградации целлюлозных композитов в разных почвенных условиях

Table 3

Reliability of differences in the degree of degradation of cellulose composites under different soil conditions

Материал Material	Число степеней свободы Number of degrees of freedom	Сравниваемые виды субстратов Comparable types of substrates	Значение критического t-критерия при $p < 0,05$ The value of the critical t-test at $p < 0,05$	Критерий Стьюдента (рассчитанный) Student's t-test (calculated)
Композиция 1 Composition 1	24	Почва из-под ельника черничного и компост Soil from under a blueberry spruce forest and compost	2,064	0,87
	25	Почва из-под ельника черничного и торфоземельная смесь Soil from under a blueberry spruce forest and a peat soil mixture	2,060	1,09
	23	Торфоземельная смесь и компост Peat soil mixture and compost	2,069	2,10
Композиция 2 Composition 2	24	Почва из-под ельника черничного и компост Soil from under a blueberry spruce forest and compost	2,064	2,32
	24	Почва из-под ельника черничного и торфоземельная смесь Soil from under a blueberry spruce forest and a peat soil mixture	2,064	0,78
	26	Торфоземельная смесь и компост Peat soil mixture and compost	2,056	2,04

Источник: собственные вычисления авторов Source: own calculations

В период проведения опыта, нами обнаружено постоянное присутствие дождевых червей. В конце опыта при извлечении пластин количество их на каждый вегетационный сосуд варьировалось от 15 до 20 шт. Визуальная оценка поведения червей рода *Allolobophora* и их состояния в течение всего периода эксперимента показала отсутствие каких-либо признаков стресса: черви сохраняли нормальную подвижность, не наблюдалось их миграции к поверхности почвы. Данный факт свидетельствует о том, что в условиях проведенного эксперимента разлагающиеся образцы из композиций 1 и 2 не оказывали негативного воздействия на почвенную фауну. Следует отметить, что данный вывод основан на качественной оценке и требует дальнейшего подтверждения с использованием количественных методов анализа состояния почвенных сред. Полученный результат может рассматриваться, как аргумент в пользу экологической безопасности материала для его применения в целях лесовосстановления.

Заключение

Установлено, что оба материала демонстрируют высокую скорость биodeградации в естественных почвенных условиях, достигая в среднем 87 % и 84 % потери массы. Прогнозируемое время их полного разложения не превышает двух месяцев и носит оценочный характер, поскольку основано на ограниченном числе экспериментальных точек. Статистический анализ подтвердил, что тип целлюлозной композиции является значимым фактором, влияющим на скорость процесса в каждой конкретной почве. Наибольшая активность разложения наблюдалась в торфоземельной смеси.

В ходе эксперимента с использованием дождевых червей в качестве биоиндикаторов не было выявлено визуально наблюдаемых признаков негативного воздействия разлагающихся образцов на почвенную фауну. При этом данный вывод основан на качественной оценке и требует дополнительного подтверждения с применением количественных методов исследования.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и выборе биоразлагаемых кассет для выращивания семян, предназначенных для последующего применения в технологии индустриального лесовосстановления. Использование таких изделий позволяет потенциально сократить образование трудноутилизируемых пластиковых отходов, снизить нагрузку на систему переработки отходов и повысить экологическую устойчивость технологического цикла выращивания посадочного материала.

Таким образом, полученные данные демонстрируют, что биоразлагаемые кассеты представляют собой перспективную альтернативу пластиковым кассетам, позволяя устранить образование долговременных отходов. Результаты работы свидетельствуют о возможности использования как композиции на основе сучковой массы, так и композиции ПЦ и ЦВВ для производства биоразлагаемых кассет. Применение данных кассет, обеспечивая быстрое и полное разложение, делает их целесообразными для использования при искусственном лесовосстановлении.

Список литературы

1. Kibria M., Masuk N., Safayet R., Nguyen H., Mourshed M. Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management. *International Journal of Environmental Research*. 2023; 17(20): 1-37. – DOI: 10.1007/s41742-023-00507-z.
2. Ярославов А.А., Аржаков М.С., Хохлов А.Р. Жизненный цикл полимерного материала: проблемы и перспективы // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – С. 15-22. – DOI: 10.31857/S086958732201011X.
3. Meera R., Gaurav P., Kumud P., Becky A., Gaurav K., Harikesh S., Vishal T. Microplastic Pollution in Terrestrial Ecosystems and Its Interaction with Other Soil Pollutants: A Potential Threat to Soil Ecosystem Sustainability. *Resources*, 2023; 12(6): 67. – DOI: 10.3390/resources12060067.
4. Mrittika D., Roman S., Lokendra P., Martin H. Molded Pulp Products for Sustainable Packaging: Production Rate Challenges and Product Opportunities. *BioResources*. 2022; 17(2): 3810-3870. – DOI: 10.15376/biores.17.2.Debnath.
5. Zhang Y., Duan C., Bokka S. K., He Z. Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics: A mini review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2022; 7(1): 16-19. – DOI: 10.1016/j.jobab.2021.10.003.
6. Joines M., Akpan S., Ibuot A. Bioconversion of waste paper into soil conditioner and its effect on plants growth and microbial population of the soil. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2020; 07(01): 227-233. – DOI: 10.30574/wjarr.2020.7.1.0233.

7. Santos J., Noletto A., Azeredo H., Carvalho R., Silva C., Yoshida C. Bio-based multilayer paperboard for sustainable packaging application. *Journal of Applied Polymer Science*. 2023; 140: 37. – DOI: 10.1002/app.54415.
8. Vikman M., Mikkelsen A., Rautkoski H. The impact of lignin content on the biodegradation of virgin paper pulps in soil and marine environment. *BioResources*. 2024; 19(2): 2452-2465. – DOI: 10.15376/biores.19.2.2452-2465.
9. Stocker C.W., Wong V.N.L., Patti A.F., Garnier G. Effect of lignin in cellulose nanofibers on biodegradation and seed germination. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2024; 11(15): 1-11. –DOI: 10.1186/s40538-023-00528-y.
10. Kwon S., Meza L., Pawlak J., Venditti R. Effect of paper-making additives on biodegradation of lignocellulosic fibers. *BioResources*. 2024; 19(4): 8028-8043. – DOI: 10.15376/biores.19.4.8028-8043.
11. Hubbe M., Daystar J., Venditti R., Pawlak J., Zambrano M., Barlaz M., Ankeny M., Pires S. Biodegradability of cellulose fibers, films, and particles: a review. *BioResources*. 2025; 20: 2391-2458. – DOI: 10.15376/biores.20.1.Hubbe.
12. Ibzhanova A., Niyazbekova R., Azzam K., Negim E., Serepayeva M., Akibekov O. Biodegradability of Non-wood Packaging Paper. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2022; 65: 131-139. – DOI: 10.21608/EJCHEM.2022.110548.5033.
13. Poluszyńska J., Ciesielczuk T., Biernacki M., Paciorkowski M. The effect of temperature on the biodegradation of different types of packaging materials under test conditions. *Journal article*. 2021; 47: 1-10. – DOI: 10.24425/aep.2021.139503.
14. Erdal N., Hakkarainen M. Degradation of Cellulose Derivatives in Laboratory, Man-Made, and Natural Environments. *Biomacromolecules*. 2022; 23: 2713-2729. – DOI: 10.1021/acs.biomac.2c00336.
15. Dolci G., Intilisano M., Fava F., Venturelli V., Malpei F., Grosso M. Degradation of paper-based boxes for food delivery in composting and anaerobic digestion tests. *Bioresource Technology*. 2024; 408: 131212. – DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131212.
16. Somsesta N., Chamamporn C., Wongsopanakun N., Sonaka P., Hongrattanaichit I. Surface-coated paper packaging with nanocellulose modified with quaternary ammonium organosilane and precipitated calcium carbonate for improved water repellency and antibacterial activity. *Scientific Reports*. 2025; 15(1): 25723. – DOI: 10.1038/s41598-025-10306-5.
17. Дзюин А. Г. Влияние соломы в сочетании с минеральными, органическими и сидеральными удобрениями на биологическую активность почвы // *Агрохимия*. – 2022. – С.72-79. – DOI: 10.31857/S0002188122110059.
18. Amuah E., Fei-Baffoe B., Sackey L., Douth N., Kazapoe R. A review of the principles of composting: understanding the processes, methods, merits, and demerits. *Organic Agriculture*. 2022; 12: 547-562. – DOI: 10.1007/s13165-022-00408-z.
19. Juanga-Labayen J., Yuan Q. Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste—Part B: Development and Evaluation of Seedling Pots. *Journal Environ Res Public Health*. 2021; 18(14): 7609. – DOI: 10.3390/ijerph18147609.
20. Дрочкова А.А. Применение экологически безопасных препаратов для стимуляции всхожести семян и роста сеянцев *Pinus sylvestris* L: специальность 4.1.6 «Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Дрочкова Анна Алексеевна; Северный Арктический Федеральный Университет Им. М.В. Ломоносова. – Архангельск, 2025. – 123 с. – Библиогр.: с. 90-108. – Текст: непосредственный.

References

1. Kibria M., Masuk N., Safayet R., Nguyen H., Mourshed M. *Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management*. *International Journal of Environmental Research*. 2023; 17(20): 1-37. – DOI: 10.1007/s41742-023-00507-z.
2. Yaroslav A.A., Arshakov M.S., Hohlov A.R. *Shizneniy chick polymernogo materiaka: problemi i perspektivy* [Life cycle of polymeric materials: problems and prospects] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 92: 15-22. – DOI: 10.31857/S086958732201011X.
3. Meera R., Gaurav P., Kumud P., Becky A., Gaurav K., Harikesh S., Vishal T. *Microplastic Pollution in Terrestrial Ecosystems and Its Interaction with Other Soil Pollutants: A Potential Threat to Soil Ecosystem Sustainability*. *Resources*, 2023; 12(6): 67. – DOI: 10.3390/resources12060067.
4. Mrittika D., Roman S., Lokendra P., Martin H. *Molded Pulp Products for Sustainable Packaging: Production Rate Challenges and Product Opportunities*. *BioResources*. 2022; 17(2): 3810-3870. – DOI: 10.15376/biores.17.2.Debnath.

5. Zhang Y., Duan C., Bokka S. K., He Z. *Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics: A mini review*. Journal of Bioresources and Bioproducts. 2022; 7(1): 16-19. – DOI: 10.1016/j.jobab.2021.10.003.
6. Joines M., Akpan S., Ibuot A. *Bioconversion of waste paper into soil conditioner and its effect on plants growth and microbial population of the soil*. World Journal of Advanced Research and Reviews. 2020; 07(01): 227-233. – DOI: 10.30574/wjarr.2020.7.1.0233.
7. Santos J., Noletto A., Azeredo H., Carvalho R., Silva C., Yoshida C. *Bio-based multilayer paperboard for sustainable packaging application*. Journal of Applied Polymer Science. 2023; 140: 37. – DOI: 10.1002/app.54415.
8. Vikman M., Mikkelsen A., Rautkoski H. *The impact of lignin content on the biodegradation of virgin paper pulps in soil and marine environment*. BioResources. 2024; 19(2): 2452-2465. – DOI: 10.15376/biores.19.2.2452-2465.
9. Stocker C.W., Wong V.N.L., Patti A.F., Garnier G. *Effect of lignin in cellulose nanofibers on biodegradation and seed germination*. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2024; 11(15): 1-11. –DOI: 10.1186/s40538-023-00528-y.
10. Kwon S., Meza L., Pawlak J., Venditti R. *Effect of paper-making additives on biodegradation of lignocellulosic fibers*. BioResources. 2024; 19(4): 8028-8043. – DOI: 10.15376/biores.19.4.8028-8043.
11. Hubbe M., Daystar J., Venditti R., Pawlak J., Zambrano M., Barlaz M., Ankeny M., Pires S. *Biodegradability of cellulose fibers, films, and particles: a review*. BioResources. 2025; 20: 2391-2458. – DOI: 10.15376/biores.20.1.Hubbe.
12. Ibzhanova A., Niyazbekova R., Azzam K., Negim E., Serepayeva M., Akibekov O. *Biodegradability of Non-wood Packaging Paper*. Egyptian Journal of Chemistry. 2022; 65: 131-139. – DOI: 10.21608/EJCHEM.2022.110548.5033.
13. Poluszyńska J., Ciesielczuk T., Biernacki M., Paciorkowski M. *The effect of temperature on the biodegradation of different types of packaging materials under test conditions*. Journal article. 2021; 47: 1-10. – DOI: 10.24425/aep.2021.139503.
14. Erdal N., Hakkarainen M. *Degradation of Cellulose Derivatives in Laboratory, Man-Made, and Natural Environments*. Biomacromolecules. 2022; 23: 2713-2729. – DOI: 10.1021/acs.biomac.2c00336.
15. Dolci G., Intilisano M., Fava F., Venturelli V., Malpei F., Grosso M. *Degradation of paper-based boxes for food delivery in composting and anaerobic digestion tests*. Bioresource Technology. 2024; 408: 131212. – DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131212.
16. Somsesta N., Chamamporn C., Wongsopanakun N., Sonaka P., Hongrattanavichit I. *Surface-coated paper packaging with nanocellulose modified with quaternary ammonium organosilane and precipitated calcium carbonate for improved water repellency and antibacterial activity*. Scientific Reports. 2025; 15(1): 25723. – DOI: 10.1038/s41598-025-10306-5.
17. Dzyin A. G. *Vliyaniye solomy v sochetanii s mineralnymi, jrganycheskimi i sideralnymi ydobreniyami na biologicheskuyu aktivnost pochvy* [The influence of straw in combination with mineral, organic and green manure fertilizers on the biological activity of the soil]. Agrochemistry. 2022; 72-79. (In Russ). DOI: 10.31857/S0002188122110059.
18. Amuah E., Fei-Baffoe B., Sackey L., Douth N., Kazapoe R. *A review of the principles of composting: understanding the processes, methods, merits, and demerits*. Organic Agriculture. 2022; 12: 547-562. – DOI: 10.1007/s13165-022-00408-z.
19. Juanga-Labayen J., Yuan Q. *Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste—Part B: Development and Evaluation of Seedling Pots*. Journal Environ Res Public Health. 2021; 18(14): 7609. – DOI: 10.3390/ijerph18147609.
20. Drochkova A.A. *Primenenie ekologicheskii bezopasnykh preparatov dlya stimulyachii vshoshesti semyan i rosta seyanchev Pinus sylvestris L* [Use of environmentally friendly preparations to stimulate seed germination and growth of Pinus sylvestris L seedlings]: specialty 4.1.6 «Forestry, silviculture, forest crops, agroforestry, landscaping, forest pyrology and taxation»: dissertation for the degree of candidate of agricultural sciences / Drochkova Anna Alekseevna; Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov. – Arkhangelsk, 2025. – 123 p. – Bibliography: p. 90-108. – Text: direct.

Сведения об авторах

✉ Агадуллин Данил Ринатович – соискатель (лаборант), ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>, e-mail: agadullindan@yandex.ru.

Естественные науки и лес

Гурьев Александр Владиславович – кандидат т.-х наук, заместитель начальника научно-исследовательского управления, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация, e-mail: a.guriev@narfu.ru.

Лебедева Ольга Петровна – старший преподаватель кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, зав. лабораторией клонального микроразмножения растений и экспериментальной гидропоники, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», наб. Северной Двины, д. 17, 163002, г. Архангельск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>, e-mail: o.lebedeva@narfu.ru.

Information about the authors

✉ *Danil R. Agadullin* – applicant (laboratory worker), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-7652-6583>, e-mail: agadullindan@yandex.ru.

Aleksandr V. Guriev – candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Research Department, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation, e-mail: a.guriev@narfu.ru.

Olga P. Lebedeva – senior lecturer, Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Head of the Laboratory of Clonal Micropropagation of Plants and Experimental Hydroponics, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>, e-mail: o.lebedeva@narfu.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Изменение химического состава древесины сухостойной пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) разной давности гибели, нарушенной полиграфом уссурийским (*Polygraphus proximus* Blandford) по данным ИК-Фурье спектроскопии

Екатерина А. Артемихина^{1,2}✉, tyukatie@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>
Сергей В. Жила^{1,2}, getgain@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>
Юрий В. Данилюк^{1,2}, ura_danilyk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>
Сергей Г. Елисеев², s-555s@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>
Михаил А. Баяндин², mihaibayandin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, 660036, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, 660037, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Российская Федерация

Темнохвойные лесные экосистемы Сибири подвергаются систематическому воздействию комплекса биотических и абиотических стрессоров, включая массовые вспышки насекомых-ксилофагов, в частности деградация темнохвойных лесов, обусловлена инвазией уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford). В данном исследовании представлен подход к изучению древесины из нарушенных инвайдером насаждений пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) методом инфракрасной-Фурье спектроскопии. Полученные нами результаты указывают на явную динамику устойчивости компонентов древесины пихты сибирской из нарушенных полиграфом уссурийским древостоев во времени. Установлено, что гемицеллюлозы и аморфная целлюлоза выявили высокую скорость деструкции в сухостойных образцах пятилетней давности гибели, на что указывали снижение интенсивностей полос поглощения при 1024 и 892 см⁻¹. Ароматический скелет лигнина (1504 см⁻¹) выявил стабильность в образцах с десятилетней давностью гибели, тем не менее выявлено продолжающееся во времени окисление и модификация лигнина, о чем свидетельствует пик полосы при 1655 см⁻¹. Следовательно, деструкция сухостойной древесины пихты сибирской носит каскадный характер, в котором сначала подвергаются деструкции легкодоступные углеводы, затем кристаллическая целлюлоза, а после происходит модификация и окисление лигнина. Таким образом, применение инфракрасной-Фурье спектроскопии позволяет диагностировать ранние стадии биодеструкции древесины, а также прогнозировать поведение древесинного вещества в процессах его переработки.

Ключевые слова: пихта сибирская, ИК-Фурье спектроскопия, полиграф уссурийский, климатический тренд

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта № FEFE-2024-0032 «Исследование закономерностей процессов биодеструкции древесины погибших древостоев для разработки научно-обоснованных подходов получения новых функциональных материалов».

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Изменение химического состава древесины сухостойной пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) разной давности гибели, нарушенной полиграфом уссурийским (*Polygraphus proximus* Blandford), по данным ИК-Фурье спектроскопии / Е. А. Артемихина, С. В. Жила, Ю. В. Данилюк, С. Г. Елисеев, М. А. Баяндин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 18–32. – Библиогр.: с. 26–31 (45 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/2>.

Поступила 09.02.2026. Пересмотрена 13.04.2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Article

Using FTIR spectroscopy to detail wood chemistry of Ussuri bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) - invaded Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) trees

Ekaterina A. Artemikhina^{1,2}✉, tyukatie@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>

Sergey V. Zhila^{1,2}, getgain@mail.ru  <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>

Yuriy V. Danilyuk^{1,2}, ura_danilyk@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>

Sergey G. Eliseev², s-555s@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

Mikhail A. Bayandin², mihailbayandin@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

¹Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, 660036, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Krasnoyarskij rabochij avenue, 31, Russian Federation

Abstract

Multiple research studies have reported dark-needled forest ecosystems of the world suffer from a number of biotic and abiotic influences including outbreaks of xylophages, in particular of bark beetles. The combination of climate change and bark beetle infestations is playing a significant role in the widespread decline of dark coniferous forests, raising concerns about the future viability of this species in some regions of the world. This paper focuses on approaches to studying Siberian fir (*Abies sibirica*) stands invaded by Ussuri bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford). This study presents an approach to studying wood from invaded Siberian fir stands using Fourier-transform infrared spectroscopy. Our results indicate clear dynamics in the stability of Siberian fir wood components from stands disturbed by the Ussuri bark beetle. Hemicelluloses and amorphous cellulose were found to exhibit high rates of degradation in dead wood samples five years after their death, as indicated by decreased absorption band intensities at 1024 and 892 cm⁻¹. The aromatic lignin skeleton (1504 cm⁻¹) was stable in dead wood samples ten years after their death. However, continued oxidation and modification of lignin was detected over time, as evidenced by the band peak at 1655 cm⁻¹. Consequently, the degradation of dead Siberian fir wood is cascade-like, with readily accessible carbohydrates first degraded, followed by crystalline cellulose, and then lignin modification and oxidation. Thus, the use of Fourier-transform infrared spectroscopy allows us to determine the age of tree death, diagnose the early stages of wood biodegradation, and predict the behavior of wood material during processing.

Keywords: *Siberian fir, FTIR spectroscopy, Ussuri polygraph, climate trend*

Funding: The work was performed as part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the implementation of the project “Studying the patterns of biodegradation of wood from dead stands in order to develop scientifically robust approaches for obtaining new functional materials” by the team of the Biorefining of Forest Resources research laboratory (№ FEFE-2024-0032)

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

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

For citation: Artemikhina E. A., Zhila S. V., Danilyuk Yu. V., Eliseev S. G., Bayandin M. A. (2026) Using FTIR spectroscopy to detail wood chemistry of Ussuri bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) - invaded Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) trees. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 18-32 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/2>.

Received 09.02.2026.

Revised 13.04.2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), выступая доминантом темнохвойных лесных массивов Сибири, формирует основу уникальных бореальных экосистем, выполняющих фундаментальные средообразующие функции и играющих важнейшую роль в регулировании климатических процессов на обширных территориях [1, 2]. В последние десятилетия эти насаждения подвергаются беспрецедентному по своей интенсивности и масштабам комплексу

негативных воздействий, среди которых особую угрозу представляют биотические факторы, в частности инвазивные вспышки массового размножения стволовых вредителей, усиливающиеся на фоне климатических трансформаций [3-5]. Исследования последних лет свидетельствуют о прогрессирующей дестабилизации темнохвойных формаций под влиянием как абиотических, так и антропогенных факторов, что проявляется в нарушении их

структурно-функциональной организации и снижении устойчивости [6-10].

Процессы массового усыхания и последующего отпада деревьев в темнохвойных лесах, подвергшихся биотическому воздействию, инициируют глубокую трансформацию вертикальной и горизонтальной структуры древесного полога [6]. Подобные нарушения закономерно приводят к частичной или полной утрате насаждениями своих базовых биосферных функций, среди которых особое значение имеют водоохранная (регулирование стока и качества вод), средообразующая (поддержание микроклимата и условий местообитания) и углерододепонирующая (долговременная секвестрация углерода в фитомассе) [7, 10, 11].

Особое место среди деструктивных факторов занимает чужеродный для сибирских экосистем вид – уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandford) [12], инвазия которого из регионов Восточной Азии приобрела характер масштабного природного бедствия [13]. За относительно короткий период с начала XXI столетия этот агрессивный стволовой вредитель не только расширил свой ареал на тысячи километров к западу от естественных границ обитания, но и сформировал устойчивые очаги массового размножения на значительной части ареала пихты сибирской [11]. Согласно современным данным, *P. proximus* представляет серьезную угрозу для пихтовых лесов не только в Сибири, но и в европейской части России, включая Средний Урал, где его присутствие впервые зафиксировано в 2023 году на территории природного парка «Оленьи ручьи» [14]. Дендрохронологический анализ показывает, что вредитель может присутствовать в насаждениях на протяжении как минимум двух десятилетий до момента обнаружения, вызывая постепенное, но неуклонное усыхание деревьев [5, 11].

Одним из наиболее значимых последствий деградации древостоев выступает коренная перестройка пожарного режима в экосистемах [15]. В нарушенных насаждениях происходит накопление мертвой древесины и как следствие, увеличение освещенности под пологом леса инициируют смену напочвенного покрова, что качественно изменяет структуру горючих материалов на поверхности почвы [16, 17]. Согласно количественным оценкам, запасы живого напочвенного покрова в насаждениях, нарушенных инвазией *P. proximus*, могут более чем в два раза превышать аналогичные показатели, по сравнению с ненарушенными [16, 18]. Накопление крупных древесных остатков (валежа) и сухостойных деревьев, в нарушенных *P. proximus* темнохвойных насаждениях, формирует непрерывный по вертикали и горизонтали

проводниковый слой, способный поддерживать низовые пожары и создающий условия для перехода огня в кроны [18].

Процессы, инициируемые атакой *P. proximus*, не ограничиваются гибелью древостоя. Вслед за отмиранием деревьев запускаются сложные механизмы биодеструкции древесинного вещества, которые продолжаются в сухостойной древесине на протяжении многих лет. Традиционные методы диагностики степени и типа поражения (визуальные, весовые) часто не способны выявить начальные стадии деградации, особенно при «бурой гнили», когда потеря прочности значительно опережает потерю массы [19]. Это создает серьезные проблемы как для оценки санитарного состояния лесов, так и для прогнозирования качества и поведения древесины в процессах ее промышленной переработки.

Современные представления о механизмах деструкции древесины грибами бурой гнили свидетельствуют о сложном двухстадийном процессе. На начальном этапе преобладает неферментативное окисление с участием высокореактивных гидроксильных радикалов, генерируемых в ходе реакции Фентона [20, 21]. Этот механизм обеспечивает деполимеризацию и модификацию полисахаридов и лигнина без глубокой ферментативной деградации последнего [22, 23]. Лигнин и кристаллическая целлюлоза сохраняются, поскольку грибам-деструкторам не хватает ключевых гидролитических и окислительных ферментов (например, целлюбогидролаз, литических полисахаридных монооксигеназ, мультимедных оксидаз и пероксидаз) [23]. Каскадный характер этих процессов и их временная динамика в отношении сухостойной древесины хвойных пород в условиях южно-таежных экосистем Сибири остаются недостаточно изученными.

Для интерпретации химических изменений и быстрого определения степени деградации древесины широко применяется метод инфракрасной Фурье-спектроскопии (ИКФС), зарекомендовавший себя как эффективный инструмент изучения химии разложения, требующий минимальной подготовки образца [24-26]. Метод позволяет не только идентифицировать грибную инфекцию на ранних стадиях [27], но и проследить модификацию основных полимерных компонентов клеточной стенки – целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина [28-30].

Целью данного исследования являлось выявление закономерностей трансформации химического состава древесины сухостойной пихты сибирской в зависимости от давности гибели темнохвойного насаждения, подвергшегося инвазии *P. proximus*, с применением метода ИК-Фурье спектроскопии

для интерпретации процессов биодеструкции и оценки степени деградации древесинного вещества.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Исследования охватили деградирующие пихтовые леса Козульского лесничества, расположенные в ключевой орографической зоне – на стыке Среднесибирской равнины и отрогов Восточного Саяна (водораздел Оби и Енисея). В ходе исследования нами было заложено две пробные площади (ПП-1, ПП-2) с разной степенью деградации древесного полога (рис. 1).

Исследуемые пробные площади (ПП) разделены по степени давности воздействия *P. proximus*. На ПП-1 (56°10'с.ш. и 92°12'в.д.),

здесь усыхание пихты составило до 50 %, ПП-2 характеризовалась более значительным усыханием древесного полога – до 95 % (56°11'с.ш. и 91°55'в.д.). Исследуемые древостои пихты сибирской (*A. sibirica*) являются одноярусными, средневозрастными (120–130 лет), III класса бонитета, со средними таксационными показателями: диаметр 18–22 см, высота 20–25 м, полнота 0,5–0,7. Хорошо развитый подлесок представлен спиреей, рябиной и малиной.

Дизайн эксперимента

Для определения жизненного состояния исследуемых насаждений на ПП проведено обследование древостоев в соответствии с общепринятыми таксационными методиками, с использованием современного оборудования [31].

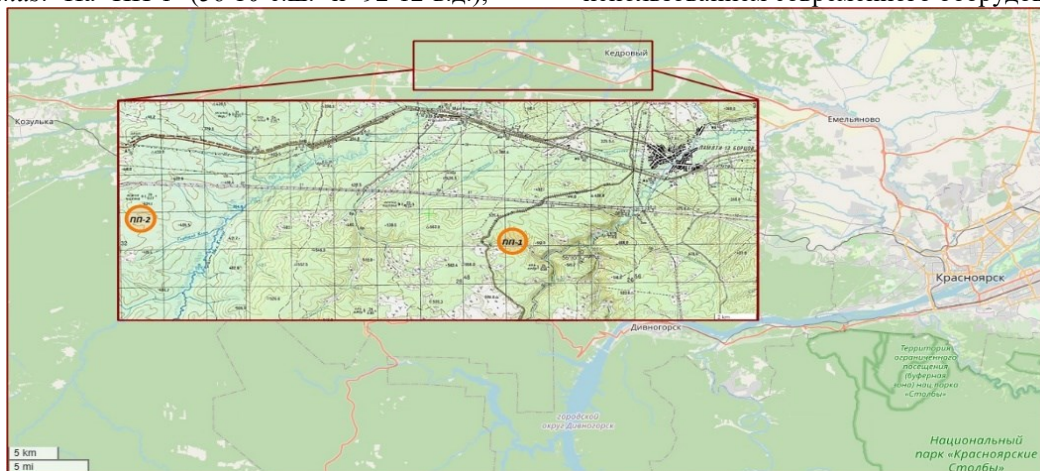


Рисунок 1. Расположение пробных площадей (ПП-1 и ПП-2)

Figure 1. Study area

Источник: карты OpenStreetMap

Source: OpenStreetMap

На каждой пробной площади закладывалось 4-5 круговых площадок (радиусом 15 м) на которых проводились работы по учету отпада деревьев (оценено не менее 200 деревьев), после вспышки *P. proximus*. Для оценки жизненного состояния деревьев *A. sibirica* использовалась стандартизированная методика визуальной оценки состояния крон, разработанная в рамках Международной кооперативной программы по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests) [32, 33]. Данная методология является общепринятым стандартом для исследований лесных экосистем в Европе и широко применяется в российских работах [34–36]. Согласно протоколу ICP Forests, выделяют следующие классы дефолиации [32]: класс 0 (здоровые деревья): дефолиация 0–10%, нормальная окраска кроны, отсутствие видимых повреждений; класс 1 (ослабленные деревья): дефолиация >10–25%, незначительное изменение окраски хвои, единичные повреждения; класс 2

(сильно ослабленные деревья): дефолиация >25–60%, выраженное изменение окраски хвои, наличие признаков заселения стволовыми вредителями; класс 3 (усыхающие деревья): дефолиация >60–<100%, преимущественно сухая или некротизированная хвоя, активное заселение ксилофагами; класс 4 (сухостой): дефолиация 100%. В рамках данного класса дополнительно выделяли свежий сухостой текущего года (хвоя полностью сухая, но сохраняющаяся на ветвях) и старый сухостой прошлых лет (хвоя отсутствует, наблюдается осыпание коры и начальные стадии деструкции древесины).

В ходе исследований жизненного состояния темнохвойных насаждений, подвергшихся воздействию *P. proximus*, был выполнен отбор древесных кернов с использованием возрастного бурава Häglof (диаметр 5,15 мм) с модельных деревьев пихты *A. sibirica* (далее по тексту Класс 4). Отбор проб проводился на высоте 1,3 м от уровня земли. Для установления возраста гибели модельных деревьев

Класса 4 проведена их перекрестная датировка (100 кернов) с использованием 30 кернов из деревьев Класса 0 пихты сибирской, произрастающих на тех же пробных площадях, что и деревья Класса 4. Таким образом, все исследуемые деревья произрастали в идентичных условиях (схожий тип почвы, рельеф и микроклимат в пределах ограниченного участка древостоя). Вышеуказанный факт гарантирует, что выявление наличия / отсутствия наблюдаемых различий в спектральных характеристиках между образцами будет обусловлено исключительно временем, прошедшим после гибели дерева. Обработку и анализ кернов производили в программе CooRecorder 9.3.1, построение и перекрестное датирование в программе CDendro 9.3.1. Древесно-кольцевые статистики вычисляли с помощью пакета dplR.

На основе таксации и категорий жизненного состояния методом перекрёстной датировки сухостойной древесины определены годы гибели пихты сибирской на пробных площадях ПП-1 и ПП-2. Деревья Класса 4 разделены на две группы по давности гибели: до 5 лет (ПУ-5, предельный год — 2018) и до 10 лет (ПУ-10) (по 5 деревьев в каждой). Контрольную группу образцов (5 деревьев) представляли деревья пихты, которые не были подвергнуты атаке *P. proximus* (Контроль).

ИКФС

Образцы древесины измельчалась в древесный порошок на криомельнице IQ MILL-2070 (Frontier, Япония). Для выявления изменений в лигно-углеводной матрице *A. sibirica* на молекулярном уровне был применен метод инфракрасной-Фурье спектроскопии (ИКФС). Метод является полезным инструментом для изучения химических процессов при воздействии грибов-деструкторов на древесину [25, 26]. Для снятия инфракрасных (ИК) спектров были использованы следующие условия: образцы древесины *A. sibirica* (1,5 мг) были помещены в матрицу KBr (100 мг) с последующим снятием спектров при помощи инфракрасного Фурье-

спектрометра «VERTEX 80V» (Bruker Optics, Германия). Спектральное разрешение $0,4 \text{ см}^{-1}$; воспроизводимость волнового числа $\pm 0,05 \text{ см}^{-1}$, спектральный диапазон от 7000 до 400 см^{-1} . Спектры получены. Анализ спектров осуществляли в программном обеспечении «OPUS» с применением векторной нормализации.

Молекулярно-генетический анализ образцов древесины *A. sibirica* был выполнен в Центре защиты леса Красноярского края, филиал ФБУ «Российский центр защиты леса», Отдел оценки состояния лесных ресурсов генетическими методами.

Статистическая обработка данных

Статистические тесты были выполнены в R (v.4.4.1), значимость была определена при $p\text{-value} < 0,05$. Для анализа и визуализации данных нами были использованы пакеты «tidyverse», «permuco» и «RVAideMemoire». Для сравнения каждой группы друг с другом был проведен попарный PERMANOVA с помощью функции pairwise.adonis2 из пакета «pairwiseAdonis», число перестановок 100000, для устранения эффекта множественных сравнений применена поправка Бенджамина-Хохберга. По результатам теста между каждой парой обнаружены значимые отличия ($p\text{-value} < 0,01$). Для проверки равенства внутригрупповых дисперсий был проведен PERMDISP (analysis of multivariate homogeneity of group dispersions (variances) с помощью функции betadisper пакета «vegan». По результатам теста значимых отличий между группами не обнаружено ($p\text{-value} = 0,63$), можно сделать вывод что значимые результаты, полученные PERMANOVA, отражают различия в положениях центроидов групп.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены результаты комплексного молекулярно-генетического анализа с применением секвенирования и видоспецифической полимеразной цепной реакции (ПЦР).

Таблица 1

Результаты комплексной молекулярно-генетической диагностики образцов древесины пихты сибирской в зависимости от давности инвазии полиграфом уссурийским

Table 1

Results of complex molecular genetic diagnostics of Siberian fir wood samples depending on the duration of Ussuri bark beetle invasion

Образец / Sample	Давность гибели, лет / Age of death of fir stands, year	Выявленные рода или виды доминирующих биодеструкторов / Identified genera or species of dominant biodegrading fungi
<i>P. proximus</i>	5	Hymenochaete cruenta, Graphilbum microcarpum, Kirschsteiniotelia sp. Fomitopsis pinicola, Phialophora sp., Leptodontidium beauverioides, Ganoderma lucidum, Armillaria mellea s. l., Inonotus sp., Phellinus sp., Fomes fomentarius.

	10	Trichoderma sp., Inonotus sp., Phellinus sp., Fomitopsis pinicola.
Контроль / Control	-	Cladosporium sp.

Из представленных в таблице 1 данных установлено, что в первые 5 лет после гибели древесины сухостойных деревьев пихты сибирской в насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским, заселяется большим количеством родов и видов деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибов – 11 ед. При этом, подавляющее большинство родов и видов грибов, содержащихся в исследованных пробах древесины, относятся к дереворазрушающим грибам, вызывающим белую гниль. К 10-летней давности гибели вследствие потери влаги древесиной сухостойных деревьев разнообразие видов миксообщества сокращается почти в 3 раза и представлено в основном трутовиками.

ИКФС является полезным методом для изучения химии разложения древесины, а также для анализа требуется минимальная подготовка образца. Метод позволяет анализировать малые количества образца (несколько миллиграмм) и широко используется для идентификации грибной инфекции [24, 29]. Полосы поглощения исследуемых образцов были изучены в области

«отпечатков пальцев» (1800-800 см⁻¹), т.к. эта область является сложной и характеристичной спектральной областью ИК-спектра. На рисунке 2 представлены полученные нами средние ИК спектры для контрольных образцов и для образцов из нарушенных полиграфом насаждений в диапазоне «отпечатков пальцев». В таблице 2 представлены максимальные значения полос поглощения для исследованных образцов *A. sibirica*.

Основные полосы соответствуют валентным колебаниям карбонильной группы (C=O) в гемицеллюлозах при 1738 см⁻¹, лигнину при 1655, 1594, 1504, 1264 и при 1238 см⁻¹ и углеводам при 1451, 1372, 1175, 1107, 1024 и при 892 см⁻¹ [28, 30, 37-39].

Для уменьшения размерности и визуализации данных был проведен анализ главных компонент (PCA). Первая и вторая главные компоненты объяснили 68,3 % и 17,8 % вариации данных соответственно, то есть 86,1 % суммарно (рис. 3).

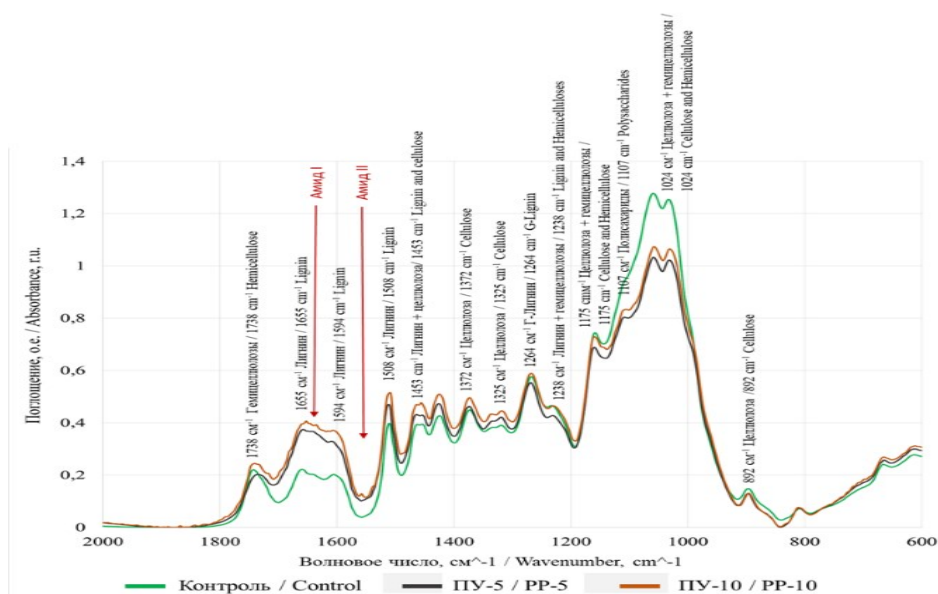


Рисунок 2. Средние ИК спектры для образцов *A. sibirica* в спектральном диапазоне 1800-800 см⁻¹
Figure 2. Mid-IR spectra for *A. sibirica* samples in 1800-800 cm⁻¹

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Основные полосы ИК-спектров в области отпечатков пальцев в древесинном веществе *A. sibirica*

Table 2

Main bands of IR spectra in the fingerprint region of woody substance of *A. sibirica*

Волновое число, см ⁻¹ / Wavenumber, cm ⁻¹	Поглощение, о.е. (относительные единицы) / Absorption, r.u. (relative units)		
	Контроль / Control	ПУ-5 / PP-5	ПУ-10 / PP-10
1738	2,284 ± 0,227	1,93 ± 0,582	2,416 ± 0,045
1655	2,216 ± 0,121	3,678 ± 0,108	4,162 ± 0,150
1652	—	—	3,902 ± 0,292
1594	2,182 ± 0,196	3,276 ± 0,269	3,61 ± 0,123
1542	—	—	0,143 ± 0,134
1504	3,81 ± 0,200	4,622 ± 0,106	5,216 ± 0,095
1461	3,832 ± 0,306	4,326 ± 0,245	4,826 ± 0,254
1372	4,354 ± 0,166	4,554 ± 0,230	4,846 ± 0,183
1325	3,864 ± 0,172	4,32 ± 0,211	4,382 ± 0,126
1264	5,708 ± 0,395	6,472 ± 0,121	7,496 ± 0,391
1238	4,392 ± 0,204	5,288 ± 0,076	5,654 ± 0,217
1175	7,376 ± 0,137	6,728 ± 0,238	7,346 ± 0,160
1107	9,322 ± 0,108	8,192 ± 0,129	8,342 ± 0,076
892	1,454 ± 0,143	0,734 ± 0,132	0,724 ± 0,135

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

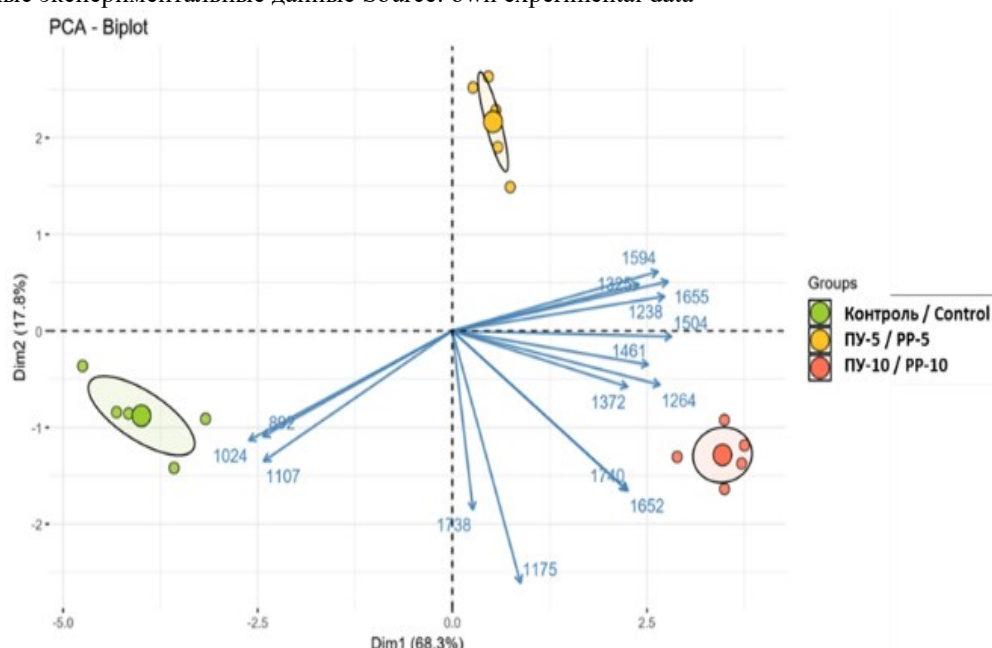


Рисунок 3. Данные, полученные методом ИКФС в пространстве главных компонент для исследуемых образцов *A. sibirica*

Figure 3. Data obtained by the FTIR method in the principal component space for the studied *A. sibirica* samples

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

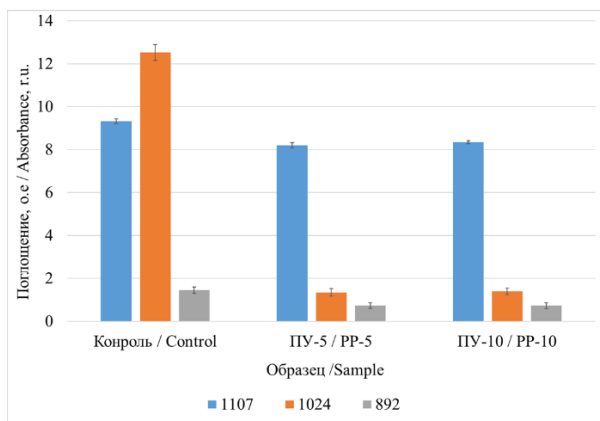
Для определения переменных, вносящих наибольший вклад в разделение данных групп, был проведен анализ SIMPER (Similarity Percentages) в евклидовых расстояниях, при помощи функции `simper` из пакета “`vegan`”. По результатам анализов можно установить, что при поражении полиграфом происходит значимое уменьшение интенсивности ИК полос при 1024,

892 и 1107 см⁻¹, и со временем появляются полосы при 1652 см⁻¹, что связано с развитием грибковой инфекции. Также, наблюдается значимый рост интенсивности ИК полос при 1655, 1504, 1264, 1594, 1325 см⁻¹. Таким образом, спектры образцов категории «Контроль» и спектры образцов, отобранных из нарушенных полиграфом насаждений, различались в полосах поглощения

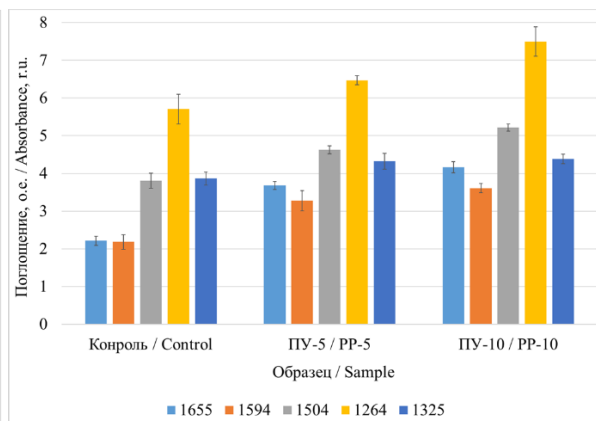
при 1655, 1504, 1264, 1594, 1325, 1594, 1024, 1107, 895 см^{-1} . и при 1655 см^{-1} . Кроме того, в образцах пихты, отобранных из насаждений, нарушенных полиграфом обнаружены маркерные полосы поглощения (1652 при 1542 см^{-1}), характерные грибам-деструкторам, которые вызывают инфекцию [27]. В образцах ПУ-5 полос поглощения, которые соответствуют Амиду I и Амиду II выявить нам не удалось (табл. 2, рис. 2).

На рисунке 4 представлены спектральные различия для образцов древесины пихты, отобранных из насаждений разной давности гибели. Как видно из рисунка 4 относительная

интенсивность полос, которые связаны с лигнином, а именно полосы поглощения при 1655, 1594, 1504, 1264, 1325 см^{-1} были сильнее, чем в контрольном образце (рис. 4 б). Полосы, связанные с углеводной компонентой при 1107, 1024, 892 см^{-1} были слабее, чем в контроле (рис. 4 а). С увеличением давности гибели насаждения интенсивность полос поглощения, которые соответствуют ароматической компоненте возрастает, а интенсивность полос поглощения, соответствующих углеводной компоненте, продолжает уменьшаться.



а)



б)

Рисунок 4. Распределение максимальных значений ИК полос поглощения, соответствующих углеводной компоненте (а) и ароматической компоненте (б), модифицированных в результате деятельности грибов-деструкторов
Figure 4. Distribution of maximum values, obtained by FTIR spectroscopy corresponding to carbohydrate component (a) and aromatic component (b) modified by various rot fungi

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

При снижении интенсивностей пиков, приписываемых углеводной компоненте на фоне возрастания интенсивностей пиков, соответствующих ароматической компоненте, происходит преимущественная деградация целлюлозы и гемицеллюлозы и модификация и/или накопление фрагментов лигнина [40, 41]. И, как видно из рисунка 4 а, процесс входит в активную фазу уже в первые 5 лет и непрерывно продолжается до достижения десятилетней давности гибели темнохвойным насаждением. Пик при полосе поглощения 1024 см^{-1} соотносится к валентным колебаниям С-О и деформационным колебаниям О-Н в целлюлозах и гемицеллюлозах [37] и резкое снижение интенсивности данного пика доказывает деструкцию углеводного комплекса. Продолжающееся снижение интенсивности пика при 892 см^{-1} (деформационные колебания атома

водорода в гликозидной связи в целлюлозе и гемицеллюлозах) [28] подтверждает деструктивные изменения, происходящие в целлюлозном комплексе на протяжении возрастающей давности гибели темнохвойного насаждения, и свидетельствует о деполимеризации целлюлозы, в частности. Кроме того, в образцах ПУ-5, выявлено снижение интенсивности пика при 1107 см^{-1} (валентные колебания С-О-С в пиранозном кольце целлюлозы) [37, 39], что указывает на прямое следствие деструкции углеводной компоненты. Таким образом, деструкция углеводного комплекса свидетельствует о глубоких изменениях на молекулярном уровне, что ведет к потере целлюлозного матрикса.

Полоса при 1325 см^{-1} имеет смешенное происхождение и относится к целлюлозе (С-Н колебания в целлюлозе) и к лигнину (С-О связь сиригильного кольца) [42, 43]. Небольшое увеличение интенсивности данной полосы в образцах ПУ-5 и ПУ-10 по сравнению с контрольными образцами (рис. 4 б) может быть обусловлено накоплением лигнина при одновременной деструкции углеводного комплекса (рис. 4 а), что и приводит к увеличению интенсивности пика при 1325 см^{-1} , который отражает модификации в целлюлозе и в лигнине.

Поскольку метод ИКФС является полуколичественным [42], то разрушение

полисахаридов привело к увеличению интенсивности полос при 1655, 1594, 1504 и 1264 см⁻¹. Интенсивности полос в образцах ПУ-5 и ПУ-10 увеличивалось по мере увеличения давности гибели насаждения, которое было нарушено полиграфом уссурийским. Таким образом, был выявлен относительных рост полос, соответствующих лигнину. Лигнин – это сложный полимер, в основном состоящий из фенилпропановых единиц, содержащих ароматические кольца, которые являются ключевой структурной особенностью лигнина и способствуют его жесткости [44]. Рост интенсивности полосы при 1655 см⁻¹ (валентные колебания сопряженных карбонильных групп (C=O) и / или колебания углерод-углеродных двойных связей (C=C) в ароматических структурах) указывает на модификацию лигнина с использованием окислительного деградиационного пути с образованием хинонов, сопряженных кетонов [45], которые, по-видимому, и повышают интенсивность в этой области. Рост интенсивности полос при 1504 см⁻¹ (валентные колебания углерод-углеродных связей (C=C) в ароматических кольцах лигнина), 1594 см⁻¹ (валентным колебаниям углерод-углеродных связей (C=C) в ароматических кольцах лигнина с существенным вкладом деформационных колебаний связей C-H в метиленовых (-CH₂-) и метоксильных (-O-CH₃) группах, связанных с ароматическим ядром), 1264 см⁻¹ (лигнин гваяцильного типа) связан с начальным этапом модификации лигнина, поскольку в образцах из темнохвойного насаждения десятилетней давности гибели не наблюдали спада интенсивности полос поглощения, относящиеся к лигнину. Следовательно, в образцах сухостойной древесины из нарушенных полиграфом уссурийским темнохвойных насаждений, в течении десяти лет после гибели деревьев происходят процессы, связанные с селективной деструкцией углеводного комплекса (аморфная часть целлюлозы и гемицеллюлозы) и началом накопления и модификации лигнина, что может быть вызвано секрецией гидролитических ферментов, которые продуцируют грибы, вызывающие бурую гниль. В литературе отмечено, что грибы бурой гнили активно разрушают углеводный комплекс для дальнейшего использования в качестве источника питания, но не разрушают лигнин полностью, а модифицируют его [22, 42]. Дереворазрушающие

грибы бурой гнили в большинстве случаев являются возбудителями процессов разложения древесины хвойных пород в бореальных лесах и разлагают холоцеллюлозу посредством эволюционно выработанного ступенчатого механизма, который заключается в биохимически контролируемом ферментативным образованием высокореактивных гидроксильных радикалов посредством реакции Фентона. По мнению исследователей, реакция Фентона является основной причиной гниения древесины [20, 21]. Образующиеся гидроксильные радикалы атакуют все полимеры, но из-за структурных особенностей делают это селективно. Лигнин и кристаллическая целлюлоза сохраняются, поскольку грибам-деструкторам не хватает ключевых гидролитических и окислительных ферментов (например, целлобиогидролаз, литических полисахаридных монооксигеназ, мультимедных оксидаз и пероксидаз) [23].

Выводы

В данном исследовании представлен подход к изучению пихтовых насаждений, подвергшихся атаке полиграфом уссурийским. Полученные нами результаты указывают на явную динамику устойчивости компонентов древесины пихты сибирской из нарушенных полиграфом уссурийским древостоев во времени. Гемицеллюлозы и аморфная целлюлоза выявили высокую скорость деструкции в сухостойных образцах пятилетней давности гибели, на что указывали снижение интенсивностей полос поглощения при 1024 и 892 см⁻¹. Ароматический скелет лигнина (1504 см⁻¹) выявил стабильность в образцах с десятилетней давностью гибели, тем не менее выявлено продолжающееся во времени окисление и модификация лигнина, о чем свидетельствует пик полосы при 1655 см⁻¹.

Следовательно, деструкция сухостойной древесины пихты сибирской носит каскадный характер, в котором сначала подвергаются деструкции легкодоступные углеводы, затем кристаллическая целлюлоза, а после происходит модификация и окисление лигнина. Таким образом, применение ИК-Фурье спектроскопии позволяет не только определять давность гибели насаждения, диагностировать ранние стадии биодеструкции древесины, а также прогнозировать поведение древесинного вещества в процессах его переработки.

Список литературы

1. Дюкарев А.Г., Копысов С.Г., Кривец С.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А. Опыт и первые результаты комплексных биогеоэкологических исследований в темнохвойных лесах юга таежной зоны Западной Сибири. Сибирский лесной журнал. – 2024. – № 3. – С. 11-24. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240303>.

2. Shestakova T.A., Rogers B.M., Mackey B., Hugh S., Norman P., Kukavskaya E.A. Tracking ecosystem stability across boreal Siberia. *Ecological Indicators*. 2024; 169: 112841. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112841>.
3. Selikhovkin A.V., Drenkhan R., Mandelshtam M., Musolin D. Invasions of insect pests and fungal pathogens of woody plants into the northwestern part of European Russia. *Earth Sciences*. 2020; 65(2): 263-283. – DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.203>.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964> (дата обращения: 15.04.2026).
5. Kerchev I.A., Bisirova E.M., Krivets S.A. Effect of the Four-Eyed Fir Bark Beetle Invasion on the Species Composition and Structure of the Siberian Fir Stem Pest Complex. *Contemporary Problems of Ecology*. 2022; 15(3): 270-281. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425522030076>.
6. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. Climate-driven conifer mortality in Siberia. *Global Ecology and Biogeography*. 2020; 30(2): 543-2556. – DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.13243>.
7. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Shushpanov A.S., Dvinskaya M.L. Climate-Induced Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) Mortality in the Siberian Mountains. *Mountain Landscapes in Transition*. 2021: 403-416. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16.
8. Sultson S.M., Goroshko A.A., Verkhovets S.V., Mikhaylov P.V., Ivanov V.A., Demidko D.A., Kulakov S.S. Orographic Factors as a Predictor of the Spread of the Siberian Silk Moth Outbreak in the Mountainous Southern Taiga Forests of Siberia. *Land*. 2021; 10: 115. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land10020115>.
9. Демидко Д.А., Ефременко А.А., Баранчиков Ю.Н. История массовых размножений сибирского шелкопряда в восточных предгорьях кузнецкого алатау: дендрохронологическая реконструкция // Сибирский лесной журнал. – 2023. – № 1. – С. 98-110. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230109>.
10. Demidko D.A., Goroshko A.A., Slinkina O.A., Mikhaylov P.V., Sultson S.M. The Role of Forest Stands Characteristics on Formation of Exterior Migratory Outbreak Spots by the Siberian Silk Moth *Dendrolimus sibiricus* (Tschetv.) during Population Collapse. *Forests*. 2023; 14(6): 1078. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061078>.
11. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Волкова Е.С., Астапенко С.А., Ефременко А.А., Косилов А.Ю., Кудрявцев П.П., Кузнецова Ю.П., Пономарев В.И., Потапкин А.Б., Тараскин Е.Г., Титова В.В., Шилоносов А.О., Баранчиков Ю.Н. Обзор современного вторичного ареала полиграфа уссурийского (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Российской Федерации // Российский журнал биологических инвазий. – 2024. – № 1. – С. 49-69. – DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-1-49-69>.
12. EPPO Global Database. *Polygraphus proximus* (POLGPR). Categorization. 2026. – URL: <https://gd.eppo.int/taxon/POLGPR/categorization> (дата обращения: 15.04.2026).
13. Kirichenko N.I., Rudoi V.V., Efremenko A.A., Petrov A.V., Baranchikov Y.N. First record of the invasive bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Republic of Kazakhstan. *Acta Biologica Sibirica*. 2023; 9: 1003-1022. – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10199570>.
14. Ponomarev V.I., Tolkach O.V., Klobukov G.I., Efremenko A.A., Pashenova N.V., Demidko D.A., Kirichenko N.I., Baranchikov Y.N. The potential threats posed by the invasive bark beetle *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) to a natural park in the Middle Urals (Russia). *Acta Biologica Sibirica*. 2024; 10: 661-675. – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12672511>.
15. 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: 1953-1974. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>.
16. Бакшеева Е.О., Головина А.Н., Морозов С.А. Лесовосстановление и пожарная опасность в пихтовых древостоях, поврежденных полиграфом уссурийским. Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. XXXIX, № 6. – С. 443-450.
17. Иванова Г.А., Кукавская Е.А., Безкоровайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Тарасов П.А. Воздействие пожаров на светлохвойные леса Нижнего Приангарья. *Наука*. – 2022. – 204 с.
18. Жила С.В., Фурьев И.В., Ковалева Н.М. Оценка запасов лесных горючих материалов в пихтовых древостоях, нарушенных полиграфом уссурийским, в Красноярском крае. *Сибирский лесной журнал*. – 2023. – № 6. – С. 76-84. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230608>.
19. Brischke C., Alfredsen G. Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020; 104: 3781-3795. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10479-1>.

20. Anderson C.E., Zhang J., Markillie L.M., Mitchell H.D., Chrisler W.B., Gaffrey M.J., Orr G., Schilling J.S. Capturing an early gene induction event during wood decay by the brown rot fungus *Rhodonia placenta*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2022; 88: e00188-22. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00188-22>.
21. Mattila H.K., Österman-Udd J., Mali T., Lundell T. Basidiomycota Fungi and ROS: genomic perspective on key enzymes involved in generation and mitigation of reactive oxygen species. *Frontiers in Fungal Biology*. 2022; 3: 837605. – DOI: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.837605>.
22. Hage H., Rosso M.N. Evolution of fungal carbohydrate-active enzyme portfolios and adaptation to plant cell-wall polymers. *Journal of Fungi*. 2021; 7: 185. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7030185>.
23. Schrader L., Brischke C., Trautner J. Microbial decay of wooden structures: actors, activities and means of protection. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2025; 109: 59. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-025-13443-z>.
24. Girometta C., Dondi D., Baiguera R.M., Bracco F., Branciforti D.S., Buratti S., Lazzaroni S., Savino E. Characterization of mycelia from wood-decay species by TGA and IR spectroscopy. *Cellulose*. 2020; 27: 6133-6148. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03208-4>.
25. Tryjarski P., Gawron J., Andres B., Obiedzińska A., Lisowski A. FTIR Analysis of Changes in Chipboard Properties after Pretreatment with *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. *Energies*. 2022; 15(23): 9101. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15239101>.
26. Qi J., Li F., Jia L., Zhang X., Deng S., Luo B., Zhou Y., Fan M., Xia Y. Fungal Selectivity and Biodegradation Effects by White and Brown Rot Fungi for Wood Biomass Pretreatment. *Polymers*. 2023; 15(8): 1957. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15081957>.
27. Gupta B.S., Jelle B.P., Gao T. In vitro cell composition identification of wood decay fungi by Fourier transform infrared spectroscopy. *Royal Society Open Science*. 2022; 9(2): 201935. – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.201935>.
28. Báder M., Németh R., Sandak J. FTIR analysis of chemical changes in wood induced by steaming and longitudinal compression. *Cellulose*. 2020; 27: 6811-6829. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03131-8>.
29. Tintner J., Spangl B., Reiter F., Smidt E., Grabner M. Infrared spectral characterization of the molecular wood decay in terms of age. *Wood Science and Technology*. 2020; 54: 313-327. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01160-x>.
30. Wittner N., Slezsák J., Broos W., Geerts J., Gergely S., Vlaeminck S.E., Cornet I. Rapid lignin quantification for fungal wood pretreatment by ATR-FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta*. 2023; 285: 121912. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121912>.
31. Нагимов З.Я., Шевелина И.В., Нагимов В.З., Артемьева И.Н. Лесотаксационные измерения: учебное пособие. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург. – 2021. – 95 с.
32. Eichhorn J., Roskams P., Potocic N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletkovic I., Schroeck H-W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wulff S. Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2020; 49.
33. Schwärzel K., Seidling W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. Strategy and Implementation of ICP Forests. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2022; 12.
34. Alekseev A., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforchin I., Chernikhovsky D., Chernov I. Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS-technologies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507(1): 012001. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012001>.
35. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V., Dmitrieva A.A. Pine needles and soil as bioindicators of forest ecosystems in the anthropogenically disturbed areas of the Baikal region. *BIO Web of Conferences*. 2024; 93: 01003. – DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301003>.
36. Narykova A.N., Plotnikova A.S., Akhmetova G.V., Danilova M.A., Kuznetsova A.I. Geospatial modeling of carbon stocks in forest litter in the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus (Leningrad Oblast). *Eurasian Soil Science*. 2025; 58: 131. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600484>.
37. Sharma V., Yadav J., Kumar R., Tesarova D., Ekielski A., Mishra P.K. On the rapid and non-destructive approach for wood identification using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Vibrational Spectroscopy*. 2020; 110: 103097. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103097>.
38. Griffin J.N., Santos G.M., Nguyen L.D., Rodriguez D.R.O., Pereira L., Jaén-Barrios N., Assis-Pereira G., Barreto N.O., Brandes A.F.N., Barbosa A.C., Groenendijk P. Demystifying the tropics: FTIR characterization of pantropical woods and their α -cellulose extracts for past atmospheric ^{14}C reconstructions. *Science of The Total Environment*. 2024; 949: 175010. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175010>.
39. Yadav A., Sharma S., Singh V., Kapoor M., Singh R. Forensic identification and differentiation of some protected timber species using ATR-FTIR spectroscopy and chemometrics. *Frontiers in Analytical Science*. 2024; 4: 1508509. – DOI: <https://doi.org/10.3389/frans.2024.1508509>.

40. Bhardwaj N., Kumar B., Agrawal K., Verma P. Current perspective on production and applications of microbial cellulases: a review. *Bioresources and Bioprocessing*. 2021; 8: 95. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00447-6>.
41. Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. Fungal ligninolytic enzymes and their application in biomass lignin pretreatment. *Journal of Fungi*. 2023; 9: 780. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9070780>.
42. High K.E., Penkman K.E.H. A review of analytical methods for assessing preservation in waterlogged archaeological wood and their application in practice. *Heritage Science*. 2020; 8: 83. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00422-y>.
43. Kumari D., Singh R. Rice straw structure changes following green pretreatment with petha wastewater for economically viable bioethanol production. *Scientific Reports*. 2022; 12: 10443. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14627-7>.
44. Ez-Zahraoui S., Hassani F.Z.S.A., Achaby M.El., Qaiss A.K., Bouhfid R. Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites. In: *Natural Fiber Composites* (ed.). Woodhead Publishing. 2023; 3-29. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00004-1>.
45. Hasegawa N., Sugiyama M., Igarashi K. Random forest machine-learning algorithm classifies white- and brown-rot fungi according to the number of the genes encoding Carbohydrate-Active enzyme families. *Applied and Environmental Microbiology*. 2024; 90: e00482-24. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00482-24>.

References

1. Dyukarev A.G., Kopysov S.G., Krivets S.A., Pats E.N., Chernova N.A. *Opyt i pervye rezul'taty kompleksnykh biogeotsenologicheskikh issledovaniy v temnokhvoynnykh lesakh yuga taezhnoy zony Zapadnoy Sibiri. Sibirskiy lesnoy zhurnal*. [Experience and first results of complex biogeocenological studies in dark coniferous forests of the southern taiga zone of Western Siberia]. *Siberian Forestry Journal*, 2024; 3: 11-24. (In Russ.) – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240303>.
2. Shestakova T.A., Rogers B.M., Mackey B., Hugh S., Norman P., Kukavskaya E.A. *Tracking ecosystem stability across boreal Siberia*. *Ecological Indicators*. 2024; 169: 112841. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112841>.
3. Selikhovkin A.V., Drenkhan R., Mandelshtam M., Musolin D. *Invasions of insect pests and fungal pathogens of woody plants into the northwestern part of European Russia*. *Earth Sciences*. 2020; 65(2): 263-283. – DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.203>.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
5. Kerchev I.A., Bisirova E.M., Krivets S.A. *Vliyanie invazii poligrafa ussuriyskogo na vidovoy sostav i strukturu kompleksa stvolovykh vrediteley pikhty sibirskoy. Sovremennyye problemy ekologii*. [Effect of the Four-Eyed Fir Bark Beetle Invasion on the Species Composition and Structure of the Siberian Fir Stem Pest Complex]. *Modern environmental problems*, 2022; 15(3): 270-281. (In Russ.) – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425522030076>.
6. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. *Climate-driven conifer mortality in Siberia*. *Global Ecology and Biogeography*. 2020; 30(2): 543-2556. – DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.13243>.
7. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Shushpanov A.S., Dvinskaya M.L. *Climate-Induced Fir (Abies sibirica Ledeb.) Mortality in the Siberian Mountains. In: Schickhoff U., Singh R., Mal S. (eds.) Mountain Landscapes in Transition. Sustainable Development Goals Series*. Cham: Springer. 2021: 403-416. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16.
8. Sultson S.M., Goroshko A.A., Verkhovets S.V., Mikhaylov P.V., Ivanov V.A., Demidko D.A., Kulakov S.S. *Orographic Factors as a Predictor of the Spread of the Siberian Silk Moth Outbreak in the Mountainous Southern Taiga Forests of Siberia*. *Land*, 2021; 10: 115. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land10020115>.
9. Demidko D.A., Efremenko A.A., Baranchikov Yu.N. *Istoriya massovykh razmnozheniy sibirskogo shelkopryada v vostochnykh predgor'yakh Kuznetskogo Alatau: dendrokronologicheskaya rekonstruktsiya. Sibirskiy lesnoy zhurnal*. [History of Siberian silk moth outbreaks in the eastern foothills of the Kuznetsk Alatau: dendrochronological reconstruction]. *Siberian Forestry Journal*, 2023; 1: 98-110. (In Russ.) – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230109>.
10. Demidko D.A., Goroshko A.A., Slinkina O.A., Mikhaylov P.V., Sultson S.M. *The Role of Forest Stands Characteristics on Formation of Exterior Migratory Outbreak Spots by the Siberian Silk Moth Dendrolimus sibiricus (Tschetv.) during Population Collapse*. *Forests*. 2023; 14(6): 1078. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061078>.
11. Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Astapenko S.A., Efremenko A.A., Kosilov A.Yu., Kudryavtsev P.P., Kuznetsova Yu.P., Ponomarev V.I., Potapkin A.B., Taraskin E.G., Titova V.V., Shilonosov A.O., Baranchikov Yu.N. *Obzor sovremennogo vtorichnogo areala poligrafa ussuriyskogo (Polygraphus proximus Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) v Rossiyskoy Federatsii. Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy*. [Overview of the current secondary range of the four-eyed fir bark beetle (Polygraphus

- proximus Blandford, 1894) in the Russian Federation]. Russian Journal of Biological Invasions, 2024; 1: 49-69. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-1-49-69>.
12. EPPO Global Database. *Polygraphus proximus* (POLGPR). Categorization. 2026. – URL: <https://gd.eppo.int/taxon/POLGPR/categorization> (accessed: 15.04.2026).
 13. Kirichenko N.I., Rudoi V.V., Efremenko A.A., Petrov A.V., Baranchikov Y.N. *First record of the invasive bark beetle Polygraphus proximus Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Republic of Kazakhstan*. Acta Biologica Sibirica. 2023; 9: 1003-1022. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10199570>.
 14. Ponomarev V.I., Tolkach O.V., Klobukov G.I., Efremenko A.A., Pashenova N.V., Demidko D.A., Kirichenko N.I., Baranchikov Y.N. *The potential threats posed by the invasive bark beetle Polygraphus proximus (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) to a natural park in the Middle Urals (Russia)*. Acta Biologica Sibirica. 2024; 10: 661-675. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12672511>.
 15. 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: 1953-1974. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>.
 16. Baksheeva E.O., Golovina A.N., Morozov S.A. *Lesovosstanovlenie i pozharnaya opasnost' v pikhtovykh drevostoyakh, povrezhdennykh poligrafom ussuriyskim*. Khvoynye boreal'noy zony. [Reforestation and fire hazard in fir stands damaged by the four-eyed fir bark beetle]. Conifers of the boreal zone, 2021; XXXIX(6): 443-450. (In Russ.).
 17. Ivanova G.A., Kukavskaya E.A., Bezkorovaynaya I.N., Bogorodskaya A.V., Zhila S.V., Ivanov V.A., Kovaleva N.M., Krasnoshchekova E.N., Tarasov P.A. *Vozdeystvie pozharov na svetlokhvoynye lesa Nizhnego Priangar'ya* [Impact of fires on light coniferous forests of the Lower Angara region]. Novosibirsk: Nauka, 2022. 204 p. (In Russ.).
 18. Zhila S.V., Furyaev I.V., Kovaleva N.M. *Otsenka zapasov lesnykh goryuchikh materialov v pikhtovykh drevostoyakh, narushennykh poligrafom ussuriyskim, v Krasnoyarskom krae*. Sibirskiy lesnoy zhurnal. [Estimation of forest fuel loads in fir stands disturbed by the four-eyed fir bark beetle in Krasnoyarsk Krai]. Siberian Forestry Journal. 2023; 6: 76-84. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230608>.
 19. Brischke C., Alfredsen G. *Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay*. Applied Microbiology and Biotechnology. 2020; 104: 3781-3795. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10479-1>.
 20. Anderson C.E., Zhang J., Markillie L.M., Mitchell H.D., Chrisler W.B., Gaffrey M.J., Orr G., Schilling J.S. *Capturing an early gene induction event during wood decay by the brown rot fungus Rhodonia placenta*. Applied and Environmental Microbiology. 2022; 88: e00188-22. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00188-22>.
 21. Mattila H.K., Österman-Udd J., Mali T., Lundell T. *Basidiomycota Fungi and ROS: genomic perspective on key enzymes involved in generation and mitigation of reactive oxygen species*. Frontiers in Fungal Biology. 2022; 3: 837605. – DOI: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.837605>.
 22. Hage H., Rosso M.N. *Evolution of fungal carbohydrate-active enzyme portfolios and adaptation to plant cell-wall polymers*. Journal of Fungi. 2021; 7: 185. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7030185>.
 23. Schrader L., Brischke C., Trautner J. *Microbial decay of wooden structures: actors, activities and means of protection*. Applied Microbiology and Biotechnology. 2025; 109: 59. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-025-13443-z>.
 24. Girometta C., Dondi D., Baiguera R.M., Bracco F., Branciforti D.S., Buratti S., Lazzaroni S., Savino E. *Characterization of mycelia from wood-decay species by TGA and IR spectroscopy*. Cellulose. 2020; 27: 6133-6148. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03208-4>.
 25. Tryjarski P., Gawron J., Andres B., Obiedzińska A., Lisowski A. *FTIR Analysis of Changes in Chipboard Properties after Pretreatment with Pleurotus ostreatus (Jacq.) P. Kumm.* Energies. 2022; 15(23): 9101. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15239101>.
 26. Qi J., Li F., Jia L., Zhang X., Deng S., Luo B., Zhou Y., Fan M., Xia Y. *Fungal Selectivity and Biodegradation Effects by White and Brown Rot Fungi for Wood Biomass Pretreatment*. Polymers. 2023; 15(8): 1957. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15081957>.
 27. Gupta B.S., Jelle B.P., Gao T. *In vitro cell composition identification of wood decay fungi by Fourier transform infrared spectroscopy*. Royal Society Open Science. 2022; 9(2): 201935. – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.201935>.
 28. Báder M., Németh R., Sandak J. *FTIR analysis of chemical changes in wood induced by steaming and longitudinal compression*. Cellulose. 2020; 27: 6811-6829. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03131-8>.
 29. Tintner J., Spangl B., Reiter F., Smidt E., Grabner M. *Infrared spectral characterization of the molecular wood decay in terms of age*. Wood Science and Technology. 2020; 54: 313-327. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01160-x>.
 30. Wittner N., Slezsák J., Broos W., Geerts J., Gergely S., Vlaeminck S.E., Cornet I. *Rapid lignin quantification for fungal wood pretreatment by ATR-FTIR spectroscopy*. Spectrochimica Acta. 2023; 285: 121912. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121912>.
 31. Nagimov Z.Ya., Shevelina I.V., Nagimov V.Z., Artemyeva I.N. *Lesotaksatsionnye izmereniya. Uchebnoe posobie*. [Forest Inventory Measurements. Tutorial]. 2021; 95 (In Russ.).

32. Eichhorn J., Roskams P., Potocic N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletkovic I., Schroeck H-W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wulff S. *Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents*. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2020; 49.
33. Schwärzel K., Seidling W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. *Strategy and Implementation of ICP Forests*. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2022; 12.
34. Alekseev A., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforhin I., Chernikhovsky D., Chernov I. *Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS-technologies*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507(1): 012001. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012001>.
35. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V., Dmitrieva A.A. *Pine needles and soil as bioindicators of forest ecosystems in the anthropogenically disturbed areas of the Baikal region*. BIO Web of Conferences. 2024; 93: 01003. – DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301003>.
36. Narykova A.N., Plotnikova A.S., Akhmetova G.V., Danilova M.A., Kuznetsova A.I. *Geospatial modeling of carbon stocks in forest litter in the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus (Leningrad Oblast)*. Eurasian Soil Science. 2025; 58: 131. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600484>.
37. Sharma V., Yadav J., Kumar R., Tesarova D., Ekielski A., Mishra P.K. *On the rapid and non-destructive approach for wood identification using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods*. Vibrational Spectroscopy. 2020; 110: 103097. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103097>.
38. Griffin J.N., Santos G.M., Nguyen L.D., Rodriguez D.R.O., Pereira L., Jaén-Barrios N., Assis-Pereira G., Barreto N.O., Brandes A.F.N., Barbosa A.C., Groenendijk P. *Demystifying the tropics: FTIR characterization of pantropical woods and their α -cellulose extracts for past atmospheric ^{14}C reconstructions*. Science of The Total Environment. 2024; 949: 175010. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175010>.
39. Yadav A., Sharma S., Singh V., Kapoor M., Singh R. *Forensic identification and differentiation of some protected timber species using ATR-FTIR spectroscopy and chemometrics*. Frontiers in Analytical Science. 2024; 4: 1508509. – DOI: <https://doi.org/10.3389/frans.2024.1508509>.
40. Bhardwaj N., Kumar B., Agrawal K., Verma P. *Current perspective on production and applications of microbial cellulases: a review*. Bioresources and Bioprocessing. 2021; 8: 95. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00447-6>.
41. Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. *Fungal ligninolytic enzymes and their application in biomass lignin pretreatment*. Journal of Fungi, 2023; 9: 780. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9070780>.
42. High K.E., Penkman K.E.H. *A review of analytical methods for assessing preservation in waterlogged archaeological wood and their application in practice*. Heritage Science. 2020; 8: 83. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00422-y>.
43. Kumari D., Singh R. *Rice straw structure changes following green pretreatment with petha wastewater for economically viable bioethanol production*. Scientific Reports. 2022; 12: 10443. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14627-7>.
44. Ez-Zahraoui S., Hassani F.Z.S.A., Achaby M.El., Qaiss A.K., Bouhfid R. *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites*. In: Natural Fiber Composites (ed.). Woodhead Publishing. 2023: 3-29. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00004-1>.
45. Hasegawa N., Sugiyama M., Igarashi K. *Random forest machine-learning algorithm classifies white- and brown-rot fungi according to the number of the genes encoding Carbohydrate-Active enzyme families*. Applied and Environmental Microbiology. 2024; 90: e00482-24. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00482-24>.

Сведения об авторах

✉ **Артемихина Екатерина Александровна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: tyukatie@gmail.com.

Жила Сергей Викторович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории лесной пирологии, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: getgain@mail.ru.

Данилюк Юрий Владимирович – старший лаборант лаборатории физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: ura_danilyk@mail.ru.

Елисеев Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», проспект им. газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, e-mail: s-555s@yandex.ru.

Баяндин Михаил Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», проспект им. газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>, e-mail: mihaibayandin@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Ekaterina A. Artemikhina* – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Physicochemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Separate Division of the FRC KSC SB RAS, st. Akademgorodok 50, building 28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: tyukatie@gmail.com.

Sergey V. Zhila – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Pyrology, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Separate Division of the FRC KSC SB RAS, st. Akademgorodok 50, building 28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: getgain@mail.ru.

Yury V. Danilyuk – Senior Laboratory Assistant, Laboratory of Physicochemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Separate Division of the FRC KSC SB RAS, st. Akademgorodok 50, building 28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: ura_danilyk@mail.ru.

Sergey G. Eliseev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Scientific Laboratory Biorefining of Forest Resources, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy avenue, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, e-mail: s-555s@yandex.ru.

Mikhail A. Bayandin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Scientific Laboratory Biorefining of Forest Resources, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy avenue, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>, e-mail: mihaibayandin@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Динамика формирования структуры и взаимосвязи основных показателей лесных культур сосны (*Pinus sylvestris* L.) на вырубке сосняка ягодникового Среднего Урала

Мария В. Ермакова, M58_07E@mail.ru✉,  0000-0002-9894-6587

*ФГБУН Ботанический сад Уральского отделения Российской Академии Наук, ул. 8 Марта, 202а,
Екатеринбург, 620144, Российская Федерация*

Объект исследования - производственные лесные культуры сосны в возрасте 6-12 лет, созданные на свежей вырубке в типе леса сосняк ягодниковый Среднего Урала. Цель исследования - оценить динамику изменения структуры и биометрических показателей и параметров кроны деревьев в производственных лесных культурах сосны обыкновенной. Исследования проводились в 2018-2024 гг. на постоянной пробной площади. При проведении полевых исследований установлено количество сохранившихся деревьев: в 6-летних культурах сохранилось 66,5%, в 9-летних 60,0 %, а в 12-летних -55,4 % от общего количества высаженных. У всех сохранившихся деревьев на постоянной пробной площади измерялись диаметр на середине высоты ствола, высота ствола, размеры кроны вдоль и поперек ряда, а также измерялась длина всех годичных побегов. Данные, полученные при полевых исследованиях, в лабораторных условиях, обрабатывались методами математической статистики. Установлено динамичное увеличение во времени средних таксационных параметров деревьев и их кроны, определенное снижение величины коэффициента вариации и амплитуды ранговых коэффициентов. Относительная стабилизация структуры по толщине ствола наблюдается только в 12-летних культурах сосны. Структура по высоте ствола значительно стабилизируется к 12-летнему возрасту лесных культур, а также окончательно определяются лидеры и наиболее отстающие по высоте деревья. Коэффициент детерминации между высотой деревьев их толщиной ствола заметно снижается с 0,653 до 0,428 увеличением возраста лесных культур сосны. Множественный коэффициент корреляции между высотой деревьев, их толщиной ствола стола и площадью проективного проекции кроны стабильно снижается с 0,897 до 0,522 с увеличением возраста лесных культур сосны.

Ключевые слова: *лесные культуры, сосна обыкновенная, структура древостоя*

Финансирование: Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН Ботанический сад УрО РАН (регистрационный номер 1022040300042-6-1.6.19;1.6.14;4.1.2)

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ермакова, М. В. Динамика формирования структуры и взаимосвязи основных показателей лесных культур сосны (*Pinus sylvestris* L.) на вырубке сосняка ягодникового Среднего Урала / М. В. Ермакова // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 33–49. – *Библиогр.: с. 46–48 (27 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/3>.

Поступила 16.02.2026. Пересмотрена 15.04.2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

Dynamics of the formation of the structure and the relationship of the main indicators of pine (*Pinus sylvestris* L.) forest crops in the felling of a berry pine forest in the Middle Urals

Maria V. Ermakova, M58_07E@mail.ru,  0000-0002-9894-6587

Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, 8-March street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation

Abstract

The object of the study is industrial forest plantations of pine aged 6-12 years, created on freshly cleared land in the berry pine forest type of the Middle Urals. The aim of the study is to assess the dynamics of changes in the structure and biometric indicators and parameters of tree crowns in industrial forest plantations of Scots pine. The research was conducted in 2018-2024 on a permanent test plot. During field studies, the number of surviving trees was determined: 66.5% of the total number of planted trees survived in 6-year-old crops, 60.0% in 9-year-old crops, and 55.4% in 12-year-old crops. For all surviving trees in the permanent trial plot, the diameter at mid-trunk height, trunk height, crown dimensions along and across the row were measured, and the length of all annual shoots was also measured. The data obtained during field studies, in laboratory conditions, were processed using mathematical statistics methods. A dynamic increase over time in the average taxation parameters of trees and their crowns, a certain decrease in the value of the variation coefficient and the amplitude of rank coefficients were established. Relative stabilization of the structure along the trunk thickness is observed only in 12-year-old pine crops. The structure of the trunk height significantly stabilizes by the age of 12 years of forest plantations, and the leaders and the most lagging trees in height are finally determined. The coefficient of determination between the height of trees and their trunk thickness significantly decreases from 0.653 to 0.428 with increasing age of pine forest plantations. The multiple correlation coefficient between tree height, tree trunk thickness and crown projection area steadily decreases from 0.897 to 0.522 with increasing age of pine forest plantations.

Keywords: *forest crops, Scots pine, stand structure*

Funding: The work was carried out within the framework of the State task of the FGBUN Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (registration number 1022040300042-6-1.6.19;1.6.14;4.1.2).

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

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

For citation: Ermakova M. V. (2026). Dynamics of the formation of the structure and the relationship of the main indicators of pine (*Pinus sylvestris* L.) forest crops in the felling of a berry pine forest in the Middle Urals. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 33-49 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/3>.

Received 16.02.2026. **Revised** 15.04.2026. **Accepted** 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем современного лесоведения и лесоводства является повышение устойчивости и продуктивности лесных насаждений хозяйственно-ценных древесных видов, в т.ч. сосны обыкновенной, создаваемых в настоящее время естественным и искусственным путем [1-3]. Для решения этой задачи, необходимо изучение особенностей формирования структурно-функциональной организации дендроценозов созданных, в частности, искусственным путем. Следует отметить, однако, что вопросам, касающимся вопросам формирования на ранних этапах структурно-функциональной организации молодых древостоев, до настоящего времени, на

наш взгляд, уделяется недостаточное внимание. Прежде всего, рассматриваются отдельные вопросы, касающиеся, например, показателей густоты молодняков, их биометрических показателей, ход роста по высоте и диаметру и т.д. [4-10]. Значительно реже рассматриваются вопросы, касающиеся формирования основного фотосинтезирующего органа - кроны деревьев [11-13]. К тому же, исследования, как правило, почти не затрагивают начальный этап развития дендроценозов – до середины I класса возраста. Этому этапу, в определенном смысле, оказывается недостаточное внимание, хотя он важен, поскольку, во многом определяет, дальнейшие процессы формирования структурно-функциональной организации древостоев [14-16].

В то же время, недостаточно изучен процесс дифференциации деревьев по росту и развитию в молодых дендроценозах и его влияние на динамику формирования их структурно-функциональной организации. При этом, при изучении динамики изменения биометрических параметров деревьев и, крайне редко, параметров кроны, за небольшим исключением, берутся значительные временные интервалы – 10, 15 и более лет [17, 18]. В тоже время на данный момент, только в отдельных исследованиях, оценивается сама структура молодых древостоев, особенно на ранних этапах формирования [19-21], при этом, практически не затрагивается, характер взаимосвязи основных биометрических показателей и параметров кроны деревьев.

На наш взгляд, сложившаяся на данный момент ситуация, требует проведения более углубленных исследований характера формирования структурно-функциональной организации молодых древостоев на самых ранних этапах его развития.

Цель нашей работы – оценить динамику изменения структуры и биометрических показателей и параметров кроны деревьев в 6-12-летних производственных лесных культурах сосны обыкновенной.

Материалы и методы

Исследования, на одной и той же пробной площади лесных культур (ППЛК), проводились в 2018-2024 гг. в центральной части общей лесокультурной площади, в соответствии с общепринятыми методиками [23]. Возраст культур при проведении исследований: 6, 9 и 12 лет. лет.

При проведении полевых исследований, в всех случаях на ППЛК, устанавливалось количество сохранившихся деревьев. У всех сохранившихся деревьев измерялись диаметр на середине высоты ствола (Д_{0,5Н}), высота ствола (Н), размеры кроны вдоль ряда и поперек ряда. Кроме того, при проведении исследований, у деревьев, сохранившихся на момент проведения исследований на ППЛК, измерялась длина всех годовичных побегов.

Для измерения диаметра использовался электронный штангенциркуль ADA Mechanic 150 Pro [A00380]. Для измерения высоты ствола использовалась электронная рулетка рулетки Карго 510-8М, а для измерения приростов по высоте и размеров кроны – металлические и деревянные линейки. Протяженность кроны измерялась в двух направлениях – вдоль и поперек ряда у каждого дерева.

Объект и предмет исследований

Объект исследований – производственные лесные культуры сосны, созданные на свежей вырубке в типе леса сосняк ягодниковый (С яг.). Объект расположен на территории Зауральской

холмисто-предгорной провинции южнотаежного округа Средне-Уральского лесного района [22]. Площадь вырубки около 20 га. Лесные культуры сосны на пробной площади лесных культур (ППЛК | SPFP) были созданы 2-летними сеянцами сосны ручной посадкой с использованием меча Колесова по бороздам плуга ПЛ-1. Средняя ширина междурядий – 3,2 м при шаге посадки – 0,6 м. Согласно сведениям, полученным от работников лесничества, на лесокультурной площади количество высаженных сеянцев составило 5 тыс. шт. Для уточнения данных, был проведен сплошной пересчет деревьев и посадочных мест на своей лесокультурной площади. Всего, согласно проведенного нами сплошного пересчета, установлено, что первоначально высажено 5,2 тыс. штук на 1 га. С момента посадки и до окончания исследований на пробной площади не осуществлялось дополнительных лесохозяйственных мероприятий и не отмечено огневого воздействия в виде пожаров.

Сбор данных

При проведении полевых исследований, в всех случаях на ППЛК, устанавливалось количество сохранившихся деревьев. У всех сохранившихся деревьев измерялись диаметр на середине высоты ствола (Д_{0,5Н}), высота ствола (Н), размеры кроны вдоль ряда и поперек ряда. Кроме того, при проведении исследований, у деревьев, сохранившихся на момент проведения исследований на ППЛК, измерялась длина всех годовичных побегов.

Для измерения диаметра использовался электронный штангенциркуль ADA Mechanic 150 Pro [A00380]. Для измерения высоты ствола использовалась электронная рулетка рулетки Карго 510-8М, а для измерения приростов по высоте и размеров кроны – металлические и деревянные линейки. Протяженность кроны измерялась в двух направлениях – вдоль и поперек ряда у каждого дерева.

Анализ данных (Data analysis)

Данные полученные при полевых исследованиях, в лабораторных условиях, методами математической статистики [24] с помощью программ Excel и Statistica 10.0.

Поскольку, в немногочисленной научной литературе площадь проекции кроны у молодых деревьев сосны, на ранних этапах формирования, чаще всего рассматривается как эллипс (правильного овал), мы посчитали возможным определение этого параметра по формуле эллипса:

$$\text{Площадь поверхности кроны} = a \cdot b \cdot \pi$$

где: a – $\frac{1}{2}$ длины кроны вдоль ряда,

b – $\frac{1}{2}$ длины кроны поперек ряда

π – число пи (3,14)

Определение ранговых коэффициентов проводилось по соответствующей методике [25]. Определялось соотношение биометрического показателя каждого дерева со средним показателем для всего искусственного древостоя. В дальнейшем, определялась амплитуда ранговых коэффициентов APK (The magnitude of the amplitude of the rank coefficients - MARC). После этого, все деревья распределялись по 5-ти ранговым классам (I - лидеры; II - сублидеры; III - средние; IV - отстающие и V – наиболее отстающие) соответствующего биометрического показателя (диаметра на середине высоты ствола и высоты ствола). Уровень изменчивости устанавливался по общепринятой методике Мамаева по величине коэффициента вариации (V) [26]

Результаты

Исследования показали, что на протяжении всего периода исследований на ППЛК наблюдался довольно заметный динамичный отпад деревьев. От общего количества высаженных деревьев сохранилось к 6-летнему возрасту - 66,5 % (3,4 тыс. шт. на 1 га), к 9-летнему – 60,0 % (3,1 тыс. шт. на 1 га), а к 12-летнему этот показатель снизился до 55,4 % (2,9 тыс. шт. на 1 га). Тем не менее, по показателю

численности деревьев сосны на площади, как и по величине средней высоты деревьев (табл. 1) лесные культуры полностью соответствовали требованиям для перевода в категорию земель, на которых расположены леса [27].

Результаты изучения средних таксационных параметров деревьев и их кроны на ППЛК, показали, что, естественно, наблюдается динамичное, существенное (при $p \leq 0,05$) увеличение этих характеристик во времени. В свою очередь, за весь период исследований, почти по всем биометрическим показателям и параметрам кроны наблюдалось определенное снижение величины коэффициента вариации (рис. 1). Исключение составил только Д0,5Н, для которого наибольшая величина коэффициента вариации наблюдалась в 9-летнем возрасте, хотя и в этом случае уровень изменчивости остался прежним по сравнению с уровнем изменчивости в 6-летнем возрасте (табл. 2). В целом, значительное снижение уровня изменчивости от повышенного к среднему и от высокого к среднему 12-летнему возрасту культур наблюдалось только по высоте деревьев и размерам кроны поперек ряда.

Таблица 1

Средние биометрические показатели и параметры кроны деревьев на ППЛК

Table 1

Average biometric indicators and parameters of tree crowns on SPFP

Возраст лесных культур, лет Age of forest plantations, years	Биометрические параметры и характеристики кроны, см (M ± m) Biometric parameters and characteristics of the crown, cm (M ± m)				
	Д0,5Н, см D0.5, H	Н, см H, cm	Крона, см Crown, cm		Площадь проекции кроны, м² Crown projection area, m²
			вдоль along	поперек across	
6	1,6 ± 0,04	112 ± 2,8	67 ± 1,9	65 ± 2,1	0,38 ± 0,021
9	3,2 ± 0,07	233 ± 3,9	111 ± 2,1	125 ± 2,4	1,15 ± 0,039
12	4,5 ± 0,10	376 ± 4,8	150 ± 2,3	174 ± 2,4	2,12 ± 0,060

Примечание: М – среднее; m – ошибка среднего

Note: M – mean; m – error of the mean

Источник: собственные вычисления автора

Source: author's own calculations

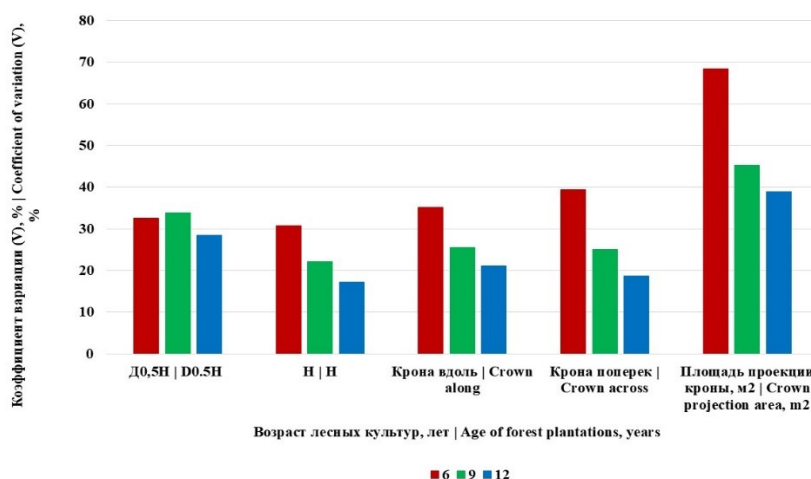


Рис. 1 Динамика величины коэффициента вариации биометрических показателей и параметров кроны (6, 9, 12 – возраст лесных культур)

Fig. 1 Dynamics of the value of the coefficient of variation of biometric indicators and crown parameters (6, 9, 12 – age of forest plantations)

Источник: собственная композиция автора
Source: author's own composition

Таблица 2

Динамика уровня изменчивости биометрических показателей и параметров кроны деревьев сосны на ППЛК

Table 2

Dynamics of the level of variability of biometric indicators and parameters of the crown of pine trees on SPFP

Возраст лесных культур, лет Age of forest plantations, years	Параметры, см Parameters, cm				
	Д0,5Н, см D0.5, H	Н, см H, cm	Крона, см Crown, cm		Площадь проекции кроны, м² Crown projection area, m2
			вдоль along	поперек across	
6	высокий	повышенный	высокий	высокий	очень -высокий
9	высокий	повышенный	повышенный	повышенный	очень высокий
12	повышенный	средний	повышенный	средний	высокий

Источник: собственные вычисления автора
Source: author's own calculations

Характер динамики уровня изменчивости по Д0,5Н и Н деревьев также подтверждается динамикой изменения АРК (рис. 2) и распределением деревьев по ранговым классам Д0,5Н и Н (рис. 3-4).

Как видно, из результатов анализа динамика изменения величины АРК по Д0,5Н и Н значительно различается. По Д0,5Н величина АРК несколько увеличилась в 9-летних культурах по сравнению с 6-летними. К 12-летнему возрасту величина АРК несколько снизилась по сравнению с 9-летними культурами и заметно снизилась по сравнению с 6-летними. Это также свидетельствует о том, что к 12-летнему возрасту у деревьев в культурах сосны, как и было показано в табл. 2, наблюдается

определенное снижение уровня изменчивости по величине Д0,5Н по сравнению с 6- и 9-летними культурами, в которых наблюдался высокий уровень изменчивости по Д0,5Н. Снижение уровня изменчивости и величины АРК в 12-летних культурах сосны показывает, что в некоторой степени, наблюдается некоторая стабилизация структуры по толщине ствола.

В свою очередь, по величине Н наблюдается планомерное снижение величины АРК с увеличением возраста культур. Наиболее заметно, снижение величины АРК по высоте ствола у 9-летних культур сосны по сравнению с 6-летними, хотя уровень изменчивости в том и другом случае характеризуется как повышенный. В 12-летних

культурах сосны, где наблюдалась наименьшая величина АРК также отмечалось снижение уровня изменчивости до среднего по высоте ствола. В данном случае, в отличие от Д0,5Н, уже можно отметить определенную стабилизацию структуры древостоя по высоте ствола.

Как видно из рис. 3, в 6-9-летнем возрасте распределение деревьев по ранговым классам Д0,5Н можно оценить, как более-менее близкое к нормальному. Однако, в 12-летнем возрасте лесных культур распределение деревьев по ранговым классам Д0,5Н определенно отличается от нормального. По всей видимости, это связано с

усиленным отпадом, преимущественно, наиболее тонких (III-V ранговый класс), вытянутых в высоту деревьев [17]. Подобные деревья являются, прежде всего, результатом конкуренции за световые условия.

Характер распределения деревьев по ранговым классам высоты у лесных культур сосны в 6-летнем возрасте заметно отличается от нормального. В 9-12-летнем возрасте, напротив, распределение деревьев по ранговым классам Н уже можно охарактеризовать практически, как нормальное

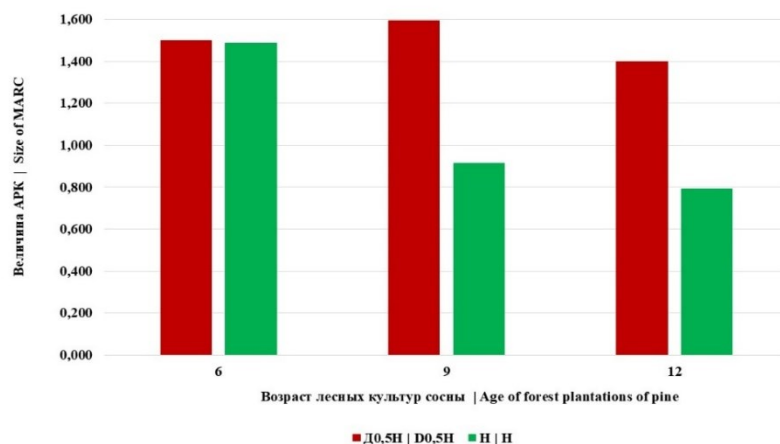


Рис. 2 Динамика изменения с возрастом амплитуды ранговых коэффициентов у деревьев сосны на ППЛК

Fig. 2 Dynamics of changes with age in the amplitude of rank coefficients in pine trees on SPFP

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

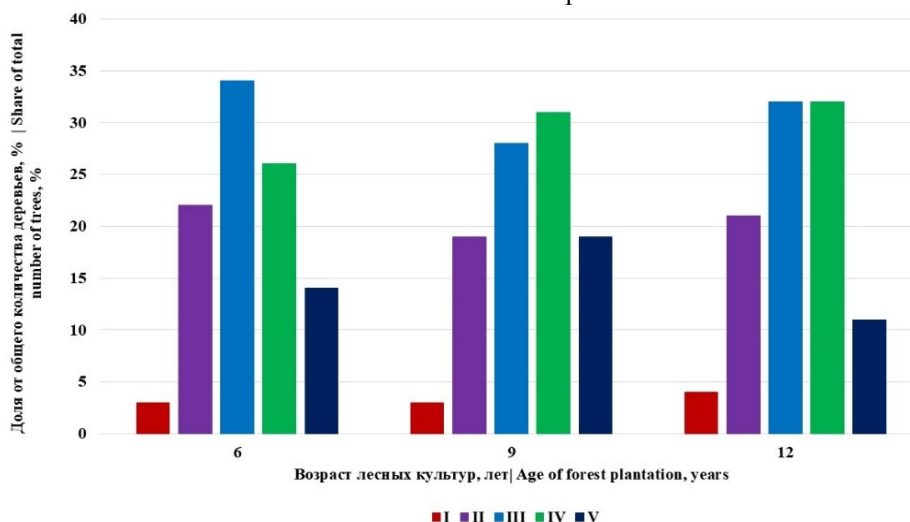


Рис.3 Динамика распределения деревьев сосны на ППЛК по ранговым классам Д0,5Н (I, II...V-ранговые классы)

Fig. 3 Dynamics of distribution of pine trees on the SPFP by rank classes Д0,5Н (I, II...V - rank classes)

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

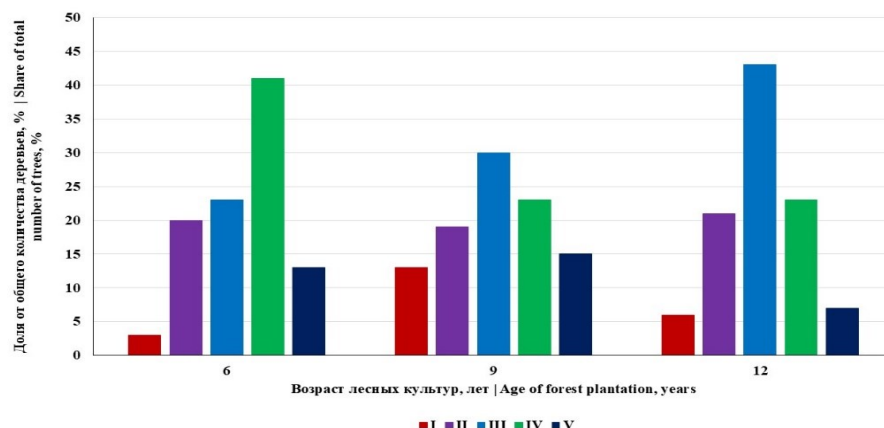


Рис.4 Динамика распределения деревьев сосны на ППЛК по ранговым классам Н (I, II...V - ранговые классы)
Fig. 4 Dynamics of distribution of pine trees on the SPFP by rank classes H (I, II...V - rank classes)

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

В то же время, обращает на себя внимание заметно изменение доли деревьев, особенно, III-IV ранговых классов по высоте в общей вертикальной структуре формирующегося древостоя. Для выяснения этого был применен метод дискриминантного анализа, где в качестве переменных использовались все приросты по высоте (рис. 5). Как известно, высота ствола представляет собой сумму годовых приростов по высоте соответственно за 6, 9 и 12 лет. Использование приростов по высоте позволит, в определенной степени, установить влияние текущих годовых приростов на общую высоту каждого дерева и, соответственно, влияние на отнесение дерева к той или иной ранговой группе по Н. Как видно из рис. 5 деревья сосны на ППЛК недостаточно четко дискриминируются по всем классам роста Н по величинам приростов по высоте. Особенно это касается 6-летних лесных культур. К возрасту 9-лет ситуация несколько улучшается и начинают более четко выделяться деревья I и V-й ранговых классов по высоте, т.е. в данном случае уже установились определенные генотипические параметры приростов в высоту. В свою очередь,

деревья II и III-й и III и IV-й ранговых групп, во всех случаях, имеют явные области пересечения.

К 12-летнему возрасту культур разделение на ранговые классы становится заметно четче. Явно выделяются деревья I и V классов по высоте. Тем не менее, сохраняются определенные области пересечения соседствующих II и III-й и III и IV-й ранговых групп. В данном случае, пока преждевременно говорить об установлении определенных генотипических параметров приростов в высоту для деревьев этих групп.

Объяснить подобную ситуацию вероятно можно тем, что динамика роста в высоту, т.е. размеры приростов по высоте, определяющие в целом высоту деревьев и их принадлежность к тому или иному ранговому классу Н, еще недостаточно, стабилизировалась. Это особенно заметно в лесных культурах в 6-9-летнем возрасте. Поэтому процессы дифференциации деревьев по высоте на ранних этапах роста протекают довольно активно. К 12-летнему возрасту лесных культур процессы дифференциации по высоте протекают уже менее активно и наблюдается их определенная стабилизация.

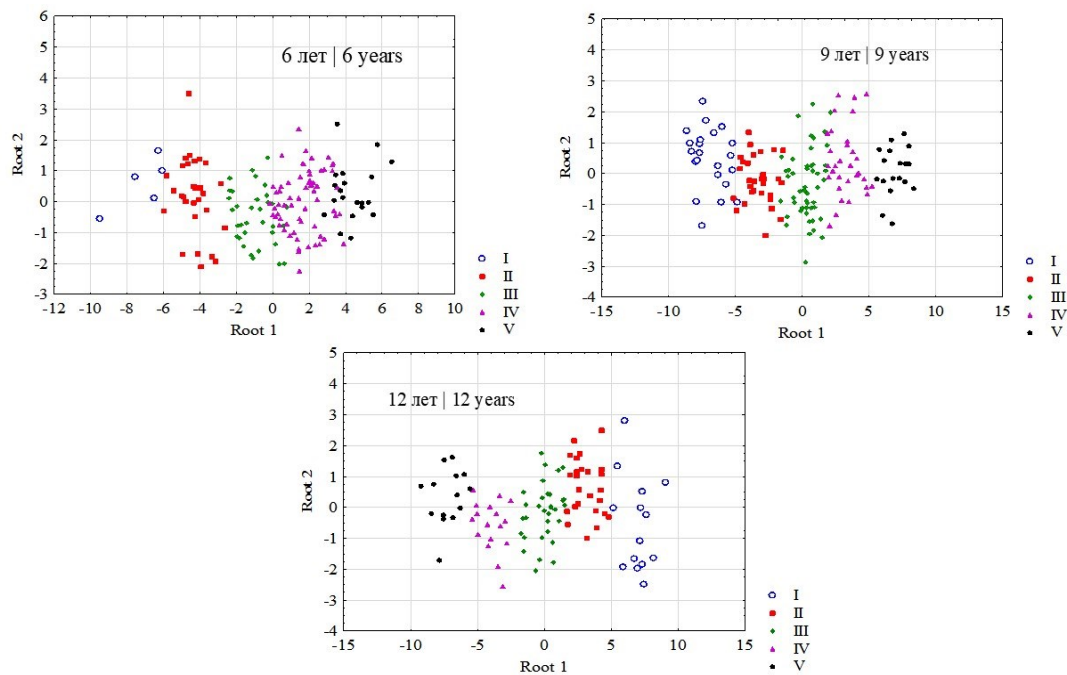


Рис. 5 Результаты дискриминации деревьев сосны на ППЛК с использованием приростов по высоте ствола по ранговым классам Н (I, II...V- ранговые классы)
Fig. 5 Results of discrimination of pine trees on the SPFP using height increment of trees by rank groups H (I, II...V- rank groups)

Источник: собственная композиция автора
Source: author's own composition

Несомненно, что подобная нестабильность, связанная с текущими приростами в радиальном направлении ствола, имеет место и при дискриминации по классам Д0,5Н, хотя на данном возрастном этапе ее технически значительно труднее оценить.

Кроме того, было установлено, деревья в лесных культурах на ППЛК могут иметь как соответствие, так и не соответствие при сопряженном распределении по ранговым классам Д0,5Н и Н. Деревья сосны, относящиеся к одному ранговому классу по Д0,5Н могут относиться как к такому же, так и более высокому или более низкому ранговому классу по Н (табл. 3). Например, наиболее крупные по толщине ствола деревья (I рангового класса по Д0,5Н) могут по высоте ствола относиться и ко II- и к III-му ранговому классу Н и т.д. Только небольшая часть наиболее крупных по толщине ствола деревьев отличалась и наиболее высокими показателями по высоте ствола. В то же время, такая сопряженность не является стабильной

и довольно лабильно изменяется по мере формирования древостоя. Об этом же свидетельствуют показатели связи между диаметром на середине высоты и высотой ствола (рис. 6, табл. 4-5). По мере формирования структурно-функциональной организации древостоя сосны, искусственного происхождения, заметно снижается, согласно величине коэффициента детерминации, и уровень взаимосвязи между диаметром на середине высоты (Д0,5Н) и высотой дерева (Н). Это свидетельствует, о продолжающихся, достаточно интенсивных процессах в дифференциации деревьев как в генотипическом, так и в ценотических аспектах, которые связаны, прежде всего, как с внутривидовой конкуренцией деревьев сосны, так и с конкуренцией за лучшие условия освещения, что крайне важно для такой светолюбивой породы как сосна обыкновенная.

Таблица 3

Динамика сопряженности деревьев сосны по ранговым классам Д0,5Н и Н

Table 3

Dynamics of conjugacy of pine trees by rank classes D0.5N and H	
Ранговый класс по	Ранговый класс по высоте ствола (Н) Rank class by the height of the trunk (H)

Д0,5Н Rank class by the D0,5Н	Возраст лесных культур, лет The age of forest plantations, years														
	6					9					12				
	Доля от общего количества деревьев, % Share of the total number of trees, %														
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
I	1	2	1	0	0	2	1	1	0	0	2	2	1	0	0
II	3	11	7	1	0	6	8	3	1	1	2	9	9	1	0
III	0	9	14	26	3	4	8	12	4	0	3	7	17	5	0
IV	0	1	9	25	5	0	1	14	12	5	0	2	14	12	4
V	0	0	0	12	12	0	1	2	6	10	0	1	2	5	3

Источник: собственные вычисления автора

Source: author's own calculations

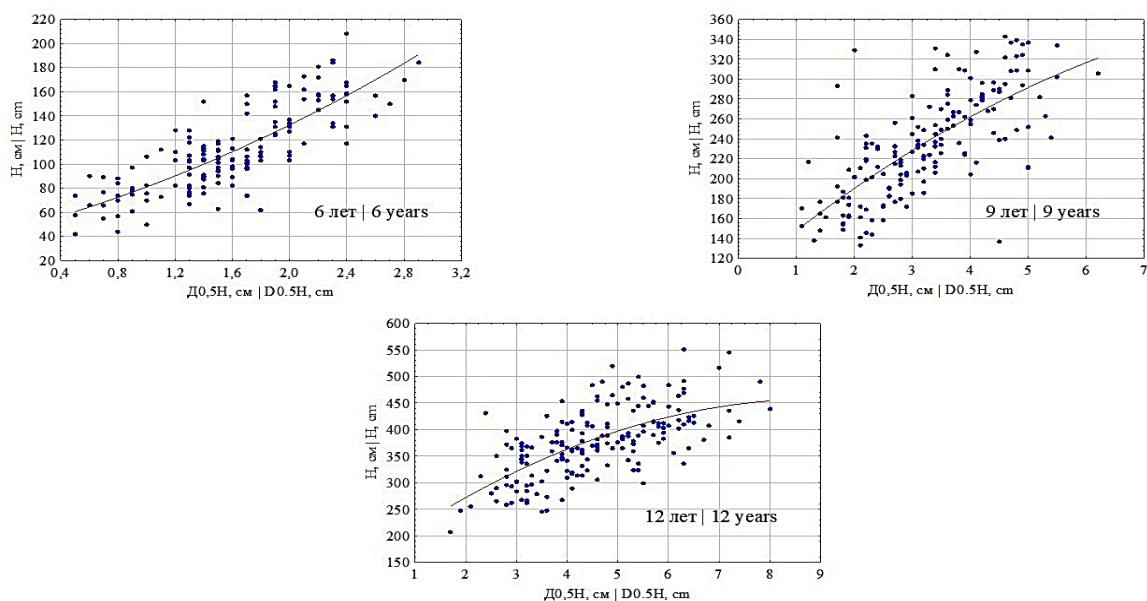


Рис. 6 Связь диаметра на середине высоты и высоты ствола у деревьев сосны на ППЛК

Fig. 6 Relationship between the diameter at mid-height and the height of the trunk of pine trees on the SPFP

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

Таблица 4

Показатели связи между диаметром на середине высоты и высотой ствола у деревьев сосны на ППЛК
(при $p \leq 0,05$)

Table 4

Relationships between mid-height diameter and trunk height in pine trees on the SPFP (at $p \leq 0,05$)

Возраст лесных культур, лет The age of forest plantations, years	Уравнение связи Equation of connection	R^2
6	$y = 43,4628 + 30,641x + 6,9335x^2$	0,653
9	$y = 101,1995 + 48,9233x - 2,1725x^2$	0,527
12	$y = 150,6515 + 68,2416x - 3,7904x^2$	0,428

Примечание. y – высота ствола; x – диаметр на середине высоты; R^2 коэффициент детерминации

Источник: собственные вычисления автора

Source: author's own calculations

Таблица 5

Уровни значимости коэффициентов показателей связи между диаметром на середине и высотой ствола на ППЖК (при $p \leq 0,05$)

Table 5

Significance levels of the coefficients of the relationship between the diameter at the middle and the height of the trunk on the SPFP (at $p \leq 0,05$)

Возраст лесных культур, лет The age of forest plantations, years	Уровень значимости коэффициентов, (p) Significance levels of the coefficients, (p)	
	x	x ²
6	0,008	0,011
9	0,010	0,015
12	0,022	0,027

Источник: собственные вычисления автора

Source: author's own calculations

Ранее было показано (табл. 1), что формирование кроны деревьев сосны по классам Н, динамично изменяется по времени, при этом значительно снижается уровень изменчивости. Распределение по ранговым классам высоты (рис. 7) проводилось, поскольку показатели высоты деревьев демонстрировали наименьшую изменчивость из всех остальных параметров.

Как установлено, в 6-летнем возрасте лесных культур, деревья сосны разных классов высоты значительно различались по размерам кроны, как вдоль, так и поперек ряда. В то же время, деревья сосны в пределах каждого класса Н практически не различались по размерам кроны вдоль и поперек ряда. Размеры крон вдоль ряда деревьев всех классов роста вполне обеспечивали смыкание и перекрытие крон внутри ряда культур.

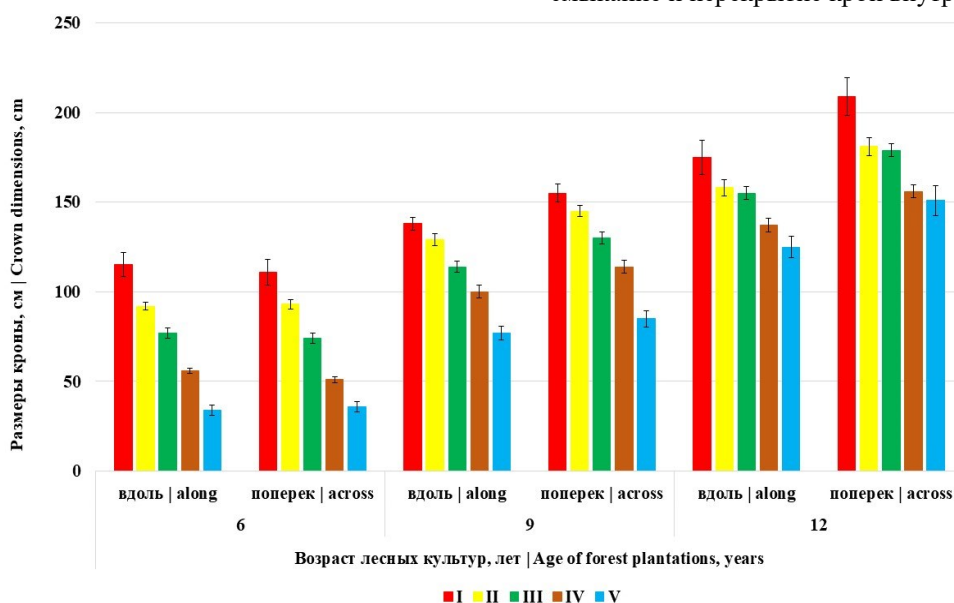


Рис. 7 Динамика изменения размеров кроны у деревьев сосны по классам Н (I...V – классы роста в высоту за соответствующий год)

Fig. 7 Dynamics of changes in crown size of pine trees by class H (I...V – height growth classes for the corresponding year)

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

К 9-летнему возрасту культур, деревья сосны разных классов высоты также значительно различались между собой по размерам кроны как

вдоль, так и поперек ряда. В то же время, в 9-летних культурах наблюдались значительно большие размеры кроны поперек ряда по сравнению с их

размерами вдоль ряда. Можно сказать, что примерно с этого возраста, начинается этап активного развития крон между рядами.

К 12-летнему возрасту культур различие между размерами крон вдоль и поперек ряда еще больше увеличилось, т.е. процесс развития крон между рядами значительно усилился.

Деревья сосны I класса роста в высоту в 12-летних культурах, во всех случаях, имели достоверно более развитую крону как вдоль, так и поперек ряда по сравнению с деревьями остальных классов.

В то же время, если у 6- и 9-летних культур наблюдалось достоверное различие в размерах кроны как вдоль, так и поперек ряда по классам высоты, то у 12-летних культур наблюдалась иная картина. У деревьев сосны II-го и III-го класса высоты размеры кроны как вдоль, так и поперек ряда различались несущественно, хотя значительно превосходили по этим параметрам деревья IV-го и V-го классов.

В свою очередь, деревья сосны IV-го класса достоверно превосходили деревья V-го класса по размерам кроны вдоль ряда, но практически не различались по размерам кроны поперек ряда.

Такие особенности формирования крон деревьев к 12-летнему возрасту объясняются, скорее всего тем, что несмотря на значительный отпад деревьев, развитие крон внутри ряда ограничивает их развитие и тем самым способствует интенсификации роста крон в свободном пространстве, т.е. в междурядьях. Этими же причинами, скорее всего, объясняются и отсутствие различий в размерах крон поперек ряда как между деревьями II-го и III-го класса высоты, так и у деревьев IV-го и V-го классов.

Установленные особенности формирования протяженности кроны вдоль и поперек ряда отразились в показателях площади проекции кроны (рис. 8).

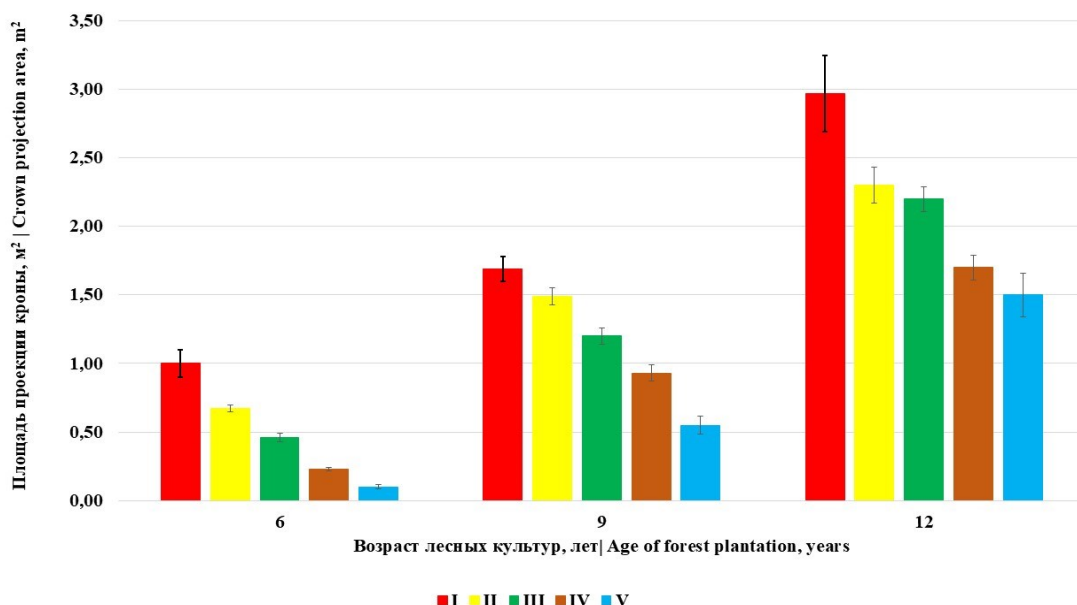


Рис. 8 Динамика изменения площади проекции кроны у деревьев сосны по классам Н (I...V – классы роста в высоту за соответствующий год)

Fig. 8 Dynamics of changes in the crown projection area of pine trees by class H (I...V – height growth classes for the corresponding year)

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

По этому показателю у 6- и 9-летних культур наблюдалось достоверное различие по классам высоты. В свою очередь, у 12-летних культур сосны деревья I класса высоты имели достоверно большую площадь проекции кроны по сравнению с деревьями других классов. Между деревьями II-го и III-го класса различия в этом показателе были несущественными, но хотя

достоверно превосходили по этому параметру деревья IV-го и V-го классов.

В свою очередь, между деревьями IV-го и V-го классов высоты не наблюдалось достоверного различия по величине площади проекции кроны. Было установлено, что в динамике, изменяется взаимосвязь основных биометрических показателей – толщины ствола и его высоты с площадью проекции кроны (рис. 9, табл. 6). На начальном

этапе, в 6-летнем возрасте лесных культур взаимосвязь между параметрами ствола деревьев сосны и площади проекции кроны была очень высокой. К 9-летнему возрасту лесных культур эта взаимосвязь оставалась довольно сильной, хотя и слабее, чем в 6-летнем возрасте. К 12-летнему возрасту взаимосвязь между биометрическими

характеристиками ствола и площадью проекции кроны стала значительно слабее

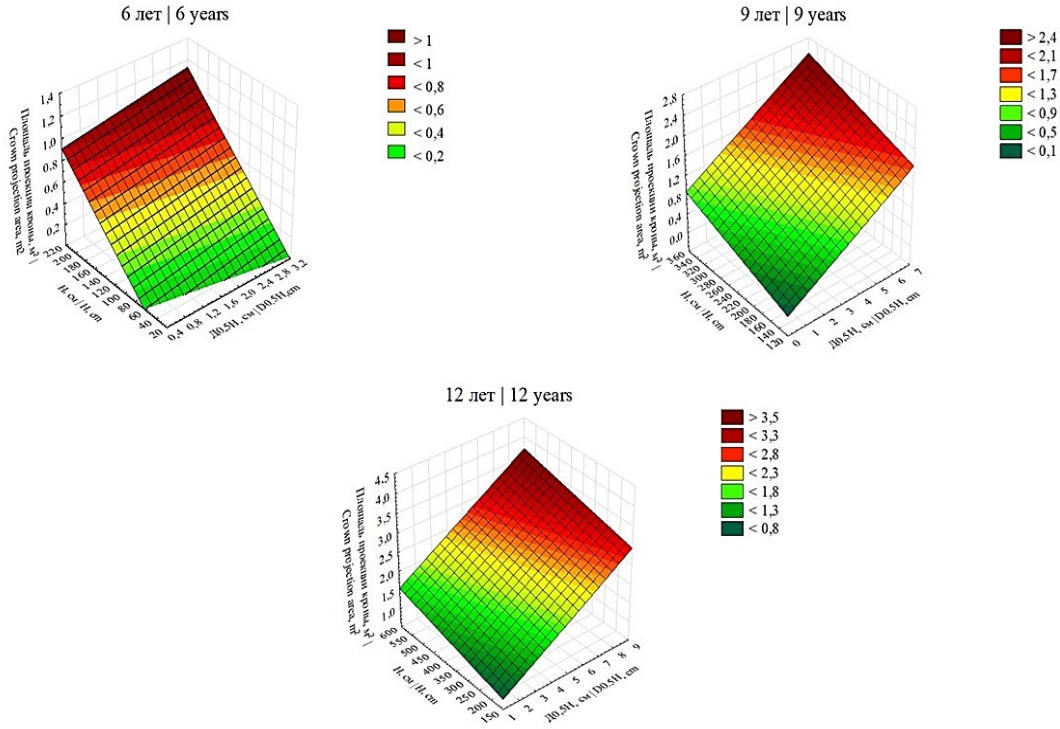


Рис. 9 Взаимосвязь диаметра на середине высоты и высоты ствола с площадью проекции кроны в лесных культурах сосны на ППЛК

Fig. 9 The relationship between the diameter at mid-height and the height of the trunk with the crown projection area in pine forest plantations on the SPFP

Источник: собственная композиция автора
Source: author's own composition

Таблица 6

Уравнения связи и мера тесноты линейной связи диаметра на середине высоты и высоты ствола с площадью проекции кроны в лесных культурах сосны на ППЛК (при $p \leq 0,05$)

Table 6

Equations of connection and measure of tightness of the linear connection between the diameter at mid-height and the height of the trunk with the crown projection area in pine forest plantations on the SPFP (at $p \leq 0,05$)

Возраст лесных культур, лет The age of forest plantations, years	Уравнение связи Equation of connection	Rz/xy
6	$z = -0,3918 + 0,0872x + 0,0058y$	0,897
9	$z = -0,422 + 0,2347x + 0,0035y$	0,719
12	$z = 0,2434 + 0,2702x + 0,0017y$	0,522

Примечание. Y – высота ствола; x – диаметр на середине высоты; $R^2_{z/xy}$ - множественный коэффициент корреляции.

Обсуждение

Таким образом, как показали наши исследования на ранних этапах, в течение довольно короткого временного промежутка, параметры структурно-функциональной организации, искусственного дендроценоза в условиях С.яг. Среднего Урала, демонстрируют значительную лабильность процессов формирования. Полученные нами результаты исследований, показывают, что при изучении динамики, как отдельных биометрических параметров, так и характеристик формирования кроны деревьев на ранних этапах формирования искусственных древостоев сосны необходимо более взвешенно подходить к выбору временных интервалов. Изучение динамики изменений формирования структурно-функциональной организации дендроценозов сосны I-го и, скорее всего II-го класса возраста, с временными промежутками в 10-15 лет, на наш взгляд не могут обеспечить объективность в оценке параметров изменений, в том числе не совсем верных их интерпретаций.

Кроме того, наши исследования, подтверждают ранее полученные данные другими исследователями о дрейфе рангового положения деревьев в искусственных насаждениях, как по высоте, так и по диаметру. Но, наш взгляд, остается еще малоизученным вопрос о сопряженной динамике рангового дрейфа по диаметру ствола и его высоте, особенно для молодых насаждений хвойных пород, хотя есть определенные подвижки в этом вопросе. Тем не менее, остаются еще, не до конца, разработанными вопросы методологии проведения изучения особенностей формирования структурно-функциональной организации молодых дендроценозов на ранних этапах.

Развитие и углубление научных исследований процессов формирования хвойных молодняков, несомненно будет способствовать оптимизации и совершенствованию в дальнейшем, проведении лесохозяйственных мероприятий

Выводы)

1. Доля сохранившихся деревьев сосны от общего количества высаженных на площади лесных культур за 6 лет сократилась с 66,5 до 55,4%. По показателям численности деревьев сосны на площади и средней высоты деревьев исследованные лесные культуры полностью соответствовали требованиям для перевода в категорию земель, на которых расположены леса. Средних таксационные параметры деревьев и их кроны демонстрировали устойчивое существенное увеличение по времени. При этом, наблюдалось определенное снижение величины коэффициента вариации хотя, в основном, уровень изменчивости оставался довольно высоким. Снижение уровня изменчивости демонстрировали только параметры высоты ствола и линейных размеров кроны в направлении междурядий, а

наиболее высокий уровень изменчивости был характерен для площади проективного покрытия кроны. Величина амплитуды ранговых коэффициентов по высоте ствола заметно и стабильно снижалась на протяжении всего периода исследований. Изменение величины амплитуды ранговых коэффициентов по толщине ствола было незначительным и носило волнообразный характер.

2. В возрасте лесных культур 6 и 9 распределение деревьев сосны по ранговым классам толщины в определенной степени близко к нормальному. В возрасте 12 лет распределение деревьев по классам толщины заметно отличается от нормального. На протяжении всего периода исследований изменение доли сублидеров, средних и наиболее отстающих по толщине деревьев носило волнообразный характер. Только в 12-летних культурах сосны наблюдается относительная стабилизация структуры по толщине ствола.

Распределение деревьев сосны по классам высоты в лесных культурах в возрасте 6 лет заметно отличается от нормального, однако, к возрасту лесных культур 9 и 12 лет соответствует параметрам нормального распределения. В исследованных лесных культурах сосны с возрастом стабильно увеличивается доля средних по высоте деревьев, но снижалась доля наиболее отстающих. Доля лидеров, сублидеров и наиболее отстающих по высоте деревьев изменялась волнообразно, с разной степенью направленности.

3. На раннем этапе, в 6-летнем возрасте лесных культур, деревья сосны на пробной площади лесных культур недостаточно дискриминируются по всем классам роста высоты по величинам приростов по высоте. Лидеры и наиболее отстающие по высоте деревья сосны начинают более четко выделяться к 9-летнему и окончательно определяются к 12-летнему возрасту лесных культур. Для сублидеров и средних по высоте деревьев, а также для средних и отстающих по высоте деревьев недостаточно четкая дискриминация сохраняется даже у лесных культур в возрасте 12-ти лет.

Сопряженное распределение по классам толщины и классам высоты на данном этапе формирования искусственного молодняка не стабильно, а взаимосвязь между толщиной и высотой деревьев сосны в лесных культурах ослабевает с возрастом по мере формирования древостоя. Взаимосвязь между высотой деревьев их толщиной ствола заметно снижается с увеличением возраста лесных культур сосны.

4. В 6-летнем возрасте лесных культур параметры кроны вдоль и поперек ряда по ранговым классам высоты практически одинаковы, а в 9-летних и 12-летних культурах наблюдается существенно большее развитие кроны между рядами.

На начальных этапах в 6-ти и 9-ти летнем возрасте лесных культур деревья разных ранговых групп высоту значительно различались по параметрам кроны как вдоль, так и поперек ряда. К 12-летнему возрасту лесных культур такое различие сохранялось только у лидеров, отстающих и наиболее отстающих по высоте деревьев. Между сублидерами и средними по высоте деревьями различие в параметрах кроны как вдоль, так и поперек ряда не наблюдалось. Различия в величине площади проективного покрытия кроны деревьев разных классов высоты оставались достоверными за весь период исследований. Взаимосвязь между высотой деревьев, их толщиной ствола стола и

площадью проективного проекции кроны стабильно снижается с увеличением возраста лесных культур сосны.

5. Процесс формирования структурно-функциональной организации молодого древостоя сосны I класса возраста на вырубке сосняка ягодникового Среднего Урала представляет собой сложный, процесс с существенными изменениями в течение довольно короткого времени, что требует более глубокого многофакторного изучения, включая исследование возрастной динамики взаимосвязей основных биометрических показателей и параметров кроны с учетом изменения сохранности высаженных деревьев.

Список литературы

1. Danneyrolles V., Boucher Y., Fournier R., Valeria O. Positive effects of projected climate change on post-disturbance forest regrowth rates in northeastern North American boreal forests. *Environ Res Lett*, 2023; 18(2):024041. doi: 10.1088/1748-9326/acb72a.
2. Donald F., Purse B.V., Green S. Investigated the role of reforestation plantings in introducing disease – A case study using phytophthora. *Forest*, 2021; 12:764. doi: 10.3390/f12060764.
3. Thiffault N., Fera J., Hoepting M.K., Jones T., Wotherspoon A. Adaptive silviculture for climate change in the Great Lakes-St. Lawrence Forest region of Canada: background and design of a long-term experiment. *For Chron*, 2024; 100(2):155-164. doi: 10.5558/tfc2024-016.
4. Собачкин Д.С., Собачкин Р.С., Петренко А.Е. Особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев разного ценотического статуса. *Сибирский лесной журнал*, 2022; № 3: 34-39. doi: 10.15372/2/SJFS202203045.
5. Пшеничникова Л.С., Онучин А.А., Собачкин Р.С., Петренко А.Е. Особенности роста сосновых культур разной густоты в условиях южной тайги Сибири. *Сибирский лесной журнал*, 2022; № 3: 24-33. doi: 10.15372/SJF20220303.
6. Корчагин И.Е., Залесов С.В., Осипенко Р.А. Динамика таксационных показателей искусственных сосновых древостоев на рекультивированном золотоотвале. *Природообустройство*, 2024; № 3: 106-111. doi: <https://doi.org/10/26897/1997-6011-2024-3-106-111>.
7. Häggström B., Domevscik M., Öhlund J., Nordin A. Survival and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings in north Sweden: effect of planting position and arginine addition. *Scand J For Res*, 2021; 36(6):423-433. doi: 10.1080/028227581.2021.1957999.
8. Häggström B., Hajek J., Nordin A., Öhlund J. Effects of planting position, seedling size, and organic nitrogen fertilization on the establishment of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) seedlings. *Forests*, 2024; 15(4):703. doi: 10.3390/f15040703.
9. Nordin P., Olofsson E., Hjelm K. Within-site adaptation: Growth and mortality of Norway spruce, Scots pine and Silver birch seedlings in different planting positions across a soil moisture gradient. *Silva Fenn*, 2023; 57(3):23004. doi: 10.14214/sf.23004.
10. Luoranen J., Salminen T., Gratz R., Saksa T. Arginine phosphate (ArGrow©) treatment on Norway spruce and Scots pine seedlings at different planting times and under varying planting site conditions in boreal forests. *For Ecol Manag*, 2024; 563:122012. doi: 10.1016/j.foreco.2024.122012.
11. Петрищев Е.П. Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления. *Лесотехнический журнал*, 2021; Т.11, № 4(44): 161-169. doi: <https://doi.org/10/34220/issn.2222-7962/2021.4/14>.
12. Крекова Я.А., Чеботько Н.К. Исследование потомства плюсовых деревьев *Pinus sylvestris* L. в испытательных культурах первой генерации. *Природообустройство*, 2023; № 3: 130-136. doi: 10.26897/1997-6011-2023-3-130-136.
13. Осипенко А.Е., Залесов С.В. Формирование морфологии деревьев культивируемых сосновых древостоев. *Известия вузов. Лесной журнал*, 2024; № 2: 105-117. doi: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-105-117>.
14. Ilintsev A., Soldatova D., Bogdanov A., Koptev S., Tretyakov S. Growth and structure of pre-mature stands of Scots pine created by direct seeding in the boreal zone. *Journal of Forest Science*, 2021; 67(1):21-35. doi: <https://doi.org/10.17221/70/2020-JFS>.

15. Сунгурова Д.Р., Дрочкова А.А. Биометрические характеристики посадочного материала как тест-показатель успешности культур *Pinus sylvestris* L. Известия вузов. Лесной журнал, 2021; № 4: 107-116. doi: 10.374482/05636-1036-2021-4-107-116.
16. Ермакова М.В. Структурно-функциональная организация естественных молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на 9-летней вырубке сосняка брусничникового Среднего Урала. Лесотехнический журнал, 2024; Т.14, № 2(54): 36-53. doi: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3>.
17. Мерзленко М.Д. Обоснование теории волнообразного роста хвойных лесных культур. Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021; Т.25, № 2: 5-9. doi: 10.18698/2542-1468-2021-2-5-9.
18. Сальникова И.С., Фадеева Е.А. Оценка хода роста сосновых насаждений естественного и искусственного происхождения. Леса России и хозяйство в них, 2023; № 1: 41-47. doi: 10.51318/FRET.2023.73.98.004.
19. Georgi L., Kz M., Fichtner A., Reich K.F., Bienert A., Maas H.G. et al. Effects of local neighbourhood diversity on crown structure and productivity of individual tree in mature mixed-species forests. For Ecosyst, 2021; 8:26. doi: 10.1186/s40663-021-00306-y.
20. Hildebrand M., Perles-Garcia M., Kunz D., Härdtle W., von Oheimb G., Fichtner A. Tree-tree interactions and crown complementarity: the role of functional diversity and branch traits for canopy packing. Basic Appl Ecol, 2021; 50:217-227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.baee.2020.12.003>.
21. Saarinen N., Kankar V., Huuskonen S. et al. Effect of stem density on crown architecture of Scots pine trees. Front Plant Sci, 2022; Vol. 13. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.817792>.
22. Fomin V., Mikhailovich A., Zalesov S., Terehov G. Development of ideas within the framework of the genetic approach to the classification of forest types. Baltic Forestry, 2021; Vol. 27, Iss. 1: 466. doi: 10.46490/BF466.
23. Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Консорциум № 4. Версия 1.0. М., 2023; 32 с.
24. Chandra G., Nautiyal R., Chandra H. (Eds.) Statistical Methods and Application in Forestry and Environmental Sciences. Springer Singapore, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1476-0>.
25. Ермакова М.В. Формирование структурно-функциональной организации молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) смешанного естественно-искусственного происхождения в условиях сосняков ягодникового Среднего Урала. Лесотехнический журнал, 2023; Т.13, № 2(50): 43-58. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3.
26. Карасева М.А., Мухортов Д.И., Лежнин К.Т. Изменчивость показателей роста семенного потомства сосны кедровой сибирской местной репродукции в Марийском Заволжье. Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование», 2023; № 1(57): 73-87. doi: 10.25686/2306-2827.2023.1.73.
27. Правила лесовосстановления... от 29 декабря 2021 г. № 1024. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74983471/> (дата обращения: 18.12.2022).

References

1. Danneyrolles V., Boucher Y., Fournier R., Valeria O. Positive effects of projected climate change on post-disturbance forest regrowth rates in northeastern North American boreal forests. Environ Res Lett, 2023; 18(2):024041. doi: 10.1088/1748-9326/acb72a.
2. Donald F., Purse B.V., Green S. Investigated the role of reforestation plantings in introducing disease – A case study using phytophthora. Forest, 2021; 12:764. doi: 10.3390/fl2060764.
3. Thiffault N., Fera J., Hoepting M.K., Jones T., Wotherspoon A. Adaptive silviculture for climate change in the Great Lakes-St. Lawrence Forest region of Canada: background and design of a long-term experiment. For Chron, 2024; 100(2):155-164. doi: 10.5558/tfc2024-016.
4. Sobachkin D.S., Sobachkin R.S., Petrenko A.E. Growth and productivity features of pine young stands formed from trees of different cenotic status. Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science, 2022; 3:34-39. doi: 10.15372/SJFS202203045 (in Russ.).
5. Pshenichnikova L.S., Onuchin A.A., Sobachkin R.S., Petrenko A.E. Growth features of pine plantations of different density in the southern taiga of Siberia. Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science, 2022; 3:24-33. doi: 10.15372/SJF20220303 (in Russ.).
6. Korchagin I.E., Zalesov S.V., Osipenko R.A. Dynamics of taxation indicators of artificial pine stands on reclaimed gold dump. Prirodoobustroystvo = Environmental Engineering, 2024; 3:106-111. doi: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-106-111> (in Russ.).
7. Häggström B., Domevscik M., Öhlund J., Nordin A. Survival and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings in north Sweden: effect of planting position and arginine addition. Scand J For Res, 2021; 36(6):423-433. doi: 10.1080/028227581.2021.1957999.

8. Häggström B., Hajek J., Nordin A., Öhlund J. Effects of planting position, seedling size, and organic nitrogen fertilization on the establishment of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) seedlings. *Forests*, 2024; 15(4):703. doi: 10.3390/f15040703.
9. Nordin P., Olofsson E., Hjelm K. Within-site adaptation: Growth and mortality of Norway spruce, Scots pine and Silver birch seedlings in different planting positions across a soil moisture gradient. *Silva Fenn*, 2023; 57(3):23004. doi: 10.14214/sf.23004.
10. Luoranan J., Salminen T., Gratz R., Saksa T. Arginine phosphate (ArGrow©) treatment on Norway spruce and Scots pine seedlings at different planting times and under varying planting site conditions in boreal forests. *For Ecol Manag*, 2024; 563:122012. doi: 10.1016/j.foreco.2024.122012.
11. Petrishchev E.P. Study of the relationship between biometric parameters of juvenile Scots pine seedlings from conditioned seeds when assessing reforestation results. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2021; Vol.11, 4(44):161-169. doi: <https://doi.org/10/34220/issn.2222-7962/2021.4/14> (in Russ.).
12. Krekova Ya.A., Chebotko N.K. Study of progeny of plus trees of *Pinus sylvestris* L. in first generation trial plantations. *Prirodoobustroystvo = Environmental Engineering*, 2023; 3:130-136. doi: 10.26897/1997-6011-2023-3-130-136 (in Russ.).
13. Osipenko A.E., Zalesov S.V. Formation of tree morphology in cultivated pine stands. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = University Proceedings. Forestry Journal*, 2024; 2:105-117. doi: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-105-117> (in Russ.).
14. Ilintsev A., Soldatova D., Bogdanov A., Koptev S., Tretyakov S. Growth and structure of pre-mature stands of Scots pine created by direct seeding in the boreal zone. *Journal of Forest Science*, 2021; 67(1):21-35. doi: <https://doi.org/10.17221/70/2020-JFS>.
15. Sungurova D.R., Drochkova A.A. Biometric characteristics of planting material as a test indicator of success of *Pinus sylvestris* L. plantations. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = University Proceedings. Forestry Journal*, 2021; 4:107-116. doi: 10.374482/05636-1036-2021-4-107-116 (in Russ.).
16. Ermakova M.V. Structural and functional organization of natural Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) young stands on a 9-year-old clearcut of lingonberry pine forest in the Middle Urals. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2024; Vol.14, 2(54):36-53. doi: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3> (in Russ.).
17. Merzlenko M.D. Justification of the theory of wave-like growth of coniferous forest plantations. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2021; Vol.25, 2:5-9. doi: 10.18698/2542-1468-2021-2-5-9 (in Russ.).
18. Salnikova I.S., Fadeeva E.A. Assessment of the growth course of pine stands of natural and artificial origin. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh = Forests of Russia and Economy in Them*, 2023; 1:41-47. doi: 10.51318/FRET.2023.73.98.004 (in Russ.).
19. Georgi L., Kz M., Fichtner A., Reich K.F., Bienert A., Maas H.G. et al. Effects of local neighbourhood diversity on crown structure and productivity of individual tree in mature mixed-species forests. *For Ecosyst*, 2021; 8:26. doi: 10.1186/s40663-021-00306-y.
20. Hildebrand M., Perles-Garcia M., Kunz D., Härdtle W., von Oheimb G., Fichtner A. Tree-tree interactions and crown complementarity: the role of functional diversity and branch traits for canopy packing. *Basic Appl Ecol*, 2021; 50:217-227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.12.003>.
21. Saarinen N., Kankar V., Huuskonen S. et al. Effect of stem density on crown architecture of Scots pine trees. *Front Plant Sci*, 2022; Vol.13. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.817792>.
22. Fomin V., Mikhailovich A., Zalesov S., Terehov G. Development of ideas within the framework of the genetic approach to the classification of forest types. *Baltic Forestry*, 2021; Vol.27, Iss.1:466. doi: 10.46490/BF466.
23. Metodika polevykh rabot po taksatsii lesa na postoyannykh probnykh ploshchadyakh v ramkakh realizatsii innovatsionnogo proekta gosudarstvennogo znacheniya «Uglerod v ekosistemakh: monitoring». Konsortsium № 4. Versiya 1.0. [Field work methodology for forest inventory on permanent sample plots within the framework of the innovative project of state importance "Carbon in ecosystems: monitoring". Consortium No. 4. Version 1.0]. Moscow, 2023; 32 p. (in Russ.).
24. Chandra G., Nautiyal R., Chandra H. (Eds.) *Statistical Methods and Application in Forestry and Environmental Sciences*. Springer Singapore, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1476-0>.
25. Ermakova M.V. Formation of structural and functional organization of mixed natural-artificial young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in conditions of berry pine forests of the Middle Urals. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2023; Vol.13, 2(50):43-58. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3 (in Russ.).
26. Karaseva M.A., Mukhortov D.I., Lezhnin K.T. Variability of growth indicators of seed progeny of Siberian stone pine of local reproduction in the Mari Volga region. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie» = Bulletin of the Volga State Technological University. Series "Forest. Ecology. Nature Management"*, 2023; 1(57):73-87. doi: 10.25686/2306-2827.2023.1.73 (in Russ.).
27. Pravila lesovosstanovleniya... ot 29 dekabrya 2021 g. № 1024 [Reforestation rules... dated December 29, 2021 No. 1024]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74983471/> (accessed: 18.12.2022) (in Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Ермакова Мария Викторовна* – доктор с.-х. наук, вед. научный сотрудник, ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», ул. 8 Марта, 202а г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9894-6587>, e-mail: M58_07E@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Mariya V. Ermakova* – Dr. Sci. (Agric.), Leading researcher of Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, Ekaterinburg, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>, e-mail: M58_07E@mail.ru.



Оценка темпов естественного возобновления вырубок усохших ельников с помощью данных дистанционного зондирования

Людмила А. Иванчина¹, ✉, ivanchina.ludmila@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>

Дмитрий В. Макурин¹, 1-0-0@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>

Егор С. Савостин¹, savostin.egor2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>

Артем Д. Деменев¹, demenevartem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>

Николай Г. Максимович¹, nmax54@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>

¹ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990, Российская Федерация

В связи с массовым усыханием еловых лесов становится актуальным вопрос их восстановления после выполнения санитарно-оздоровительных мероприятий. При необходимости обследования значительных площадей целесообразнее пользоваться дистанционными методами. Выполнен расчет межгодовых линейных трендов значений нормализованного разностного индекса растительного покрова (NDVI) и коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в красном канале снимков зарастающих вырубок, усохших в результате повреждения стволовым вредителем короедом-типографом (*Ips typographus* L.), по данным спутниковой съемки Landsat в период с 2014 по 2025 годы в зоне хвойно-широколиственных лесов Пермского края. Объекты исследований включали 26 вырубок на участках усыхания еловых древостоев, в пределах которых в 2014 году проведены сплошные санитарные рубки. В качестве контроля выбраны 3 вырубки, в границах которых проведены сплошные рубки спелых и перестойных насаждений. В результате анализа временных рядов NDVI с использованием непараметрического критерия Манна-Кендалла выявлено преобладание статистически достоверных положительных трендов при оценке динамики восстановления лиственными породами как вырубок усохших ельников (77% участков), так и контрольных участков (100% участков). На территории половины вырубок усохших ельников после сплошной санитарной рубки происходит смена пород на менее ценные лиственные. Лесовосстановление с преобладанием молодых деревьев ели зафиксировано на территории только 12% вырубок усохших ельников, что подтверждается статистически значимыми убывающими трендами КСЯ в красном канале. Анализ по типам леса демонстрирует более успешное лесовосстановление елью в условиях зеленомошного типа леса (среднее значение КСЯ составляет 0.274 ± 0.07), а менее успешное – в условиях липового типа леса (среднее значение КСЯ – 0.439 ± 0.07). Более успешно лиственными породами восстанавливаются вырубки, расположенные в условиях липового типа леса: базисный темп прироста средних значений NDVI относительно года рубки в условиях липового типа леса у экспериментальных участков достигает 249.2%, а у фоновых – 225.9%. В условиях зеленомошного и кисличного типов леса вырубки усохших ельников восстанавливаются активнее, чем вырубки, в пределах которых произрастали здоровые насаждения: темп прироста значений NDVI в условиях зеленомошного типа леса у экспериментальных участков составляет 200.6%, у фоновых не превышает 57.9%, а в условиях кисличного типа леса у экспериментальных составляет 194.8%, у фоновых – 26.8%. По мнению авторов, данная закономерность может быть объяснена относительно низкими исходными значениями NDVI во временном ряду для зарастающих вырубок усохших ельников, а также более благоприятными условиями произрастания, связанными с повышением доступности питательных веществ в почве за счет разложения опавшей еловой хвои после усыхания древостоя.

Ключевые слова: вырубки усохших ельников, дистанционное зондирование, снимки Landsat, NDVI, подрост предварительной генерации, лесовосстановление, линейные тренды, ельники, коэффициент спектральной яркости (КСЯ) в красном канале

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-10057, <https://rscf.ru/project/24-76-10057/>

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка темпов естественного возобновления вырубок усохших ельников с помощью данных дистанционного зондирования / Л. А. Иванчина, Д. В. Макурин, Е. С. Савостин, А. Д. Деменев, Н. Г. Максимович // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 50–64. – Библиогр.: с. 61–64 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/4>.

Поступила 16.03.2026. *Пересмотрена* 30.04.2026. *Принята* 15.05.2026. *Опубликована онлайн* 26.06.2026

Article

Assessment of Natural Regeneration Rates in Logged Dried-Up Spruce Forests Using Remote Sensing Data

Ludmila A. Ivanchina¹ ✉, ivanchina.ludmila@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>

Dmitrii V. Makurin¹, 1-0-0@bk.ru  <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>

Egor S. Savostin¹, savostin.egor2014@yandex.ru  <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>

Artem D. Demenev¹, demenevartem@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>

Nikolay G. Maksimovich¹, nmax54@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>

¹Perm State University, 15 Bukireva Street, Perm, 614990, Russian Federation

Abstract

Due to the widespread dieback of spruce forests, reforestation following sanitary measures has become an urgent priority. When surveying large areas, remote sensing methods are more practical. Interannual linear trends of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and spectral brightness coefficients (SBC) in the red band were calculated for regenerating clear-cut areas of dried-up spruce forests affected by the bark beetle (*Ips typographus* L.) using Landsat satellite imagery for the period 2014–2025 within the coniferous-broadleaf forest zone of Perm Krai. The study included 26 logged areas where clear sanitary cuts were carried out in 2014. Three control sites, subjected to clear cutting of mature and overmature stands, were selected for comparison. Time-series analysis of NDVI using the Mann-Kendall non-parametric test revealed a predominance of statistically significant positive trends in the recovery of deciduous species, both on cleared dried-up spruce plots (77% of sites) and control sites (100% of sites). On half of the logged dried-up spruce areas, post-sanitary cutting regeneration involved a shift to less valuable deciduous species. Forest regeneration dominated by young spruce trees was observed in only 12% of the dried-up spruce clear-cuts, which is corroborated by statistically significant decreasing trends in SBC values in the red band. Analysis of red-band SBC values by forest type indicated more successful spruce regeneration in green-moss forests (mean SBC – 0.2741) and less successful regeneration in lime-dominated forests (mean SBC – 0.4388). Conversely, deciduous species regenerated more successfully in lime forests: the rate of increase in mean NDVI values reached 249.2% on experimental plots and 225.9% on control plots. In green-moss and oxalis forest types, logged dried-up spruce plots regenerated more actively than areas previously occupied by healthy stands: in green-moss forests, the NDVI increase was 200.6% on experimental plots versus 57.9% on controls; in oxalis forests, the increase was 194.8% versus 26.8%, respectively. According to the authors, this pattern can be explained by lower initial NDVI values in the time series for regenerating logged dried-up spruce forests, as well as by more favorable growing conditions associated with increased soil nutrient availability due to the decomposition of fallen spruce needles resulting from stand drying.

Keywords: *Dried-Up Spruce Forests, Remote Sensing, Landsat imagery, NDVI, Early-stage forest regeneration, Forest Regeneration, Linear Trend, Spruce Forests, spectral brightness coefficients (SBC) in the red band*

Funding: the research was funded by a Russian Science Foundation grant № 24-76-10057, <https://rscf.ru/project/24-76-10057/>

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

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

For citation: Ivanchina L. A., Makurin D. V., Savostin E. S., Demenev A. D., Maksimovich N. G. (2026) Assessment of Natural Regeneration Rates in Logged Dried-Up Spruce Forests Using Remote Sensing Data. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 50–64 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/4>.

Received 16.03.2026.

Revised 30.04.2026.

Accepted 15.05.2026. *Published online* 26.06.2026

Введение

В последние десятилетия как в нашей стране, так и за ее пределами наблюдается массовое усыхание еловых лесов [1, 2, 3]. Единого мнения о причинах этого явления среди ученых не существует [4, 5]. При этом следует отметить, что процесс массового усыхания еловых лесов неразрывно связан с размножением и развитием стволового вредителя – короеда-типографа (*Ips typographus* Linnaeus) [6]. В целях улучшения санитарного и лесопатологического состояния лесов, снижения ущерба от воздействия биотических и абиотических неблагоприятных факторов, борьбы с болезнями и вредителями леса лесным законодательством предусмотрено проведение санитарно-оздоровительных мероприятий, в частности санитарных рубок (Приказ Минприроды (МПР) РФ от 09.11.2020 г. № 912).

В связи с непрекращающимся воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды становится актуальным вопрос восстановления вырубленных в результате усыхания лесных территорий. В научной литературе имеются работы, посвященные изучению возобновления указанных рубок полевыми методами [7], что является трудоемким процессом [8]. При необходимости обследования значительных площадей целесообразнее пользоваться дистанционными методами. Дистанционное зондирование

Материалы и методы

С целью изучения зарастания рубок после проведения санитарно-оздоровительных мероприятий, назначенных актами лесопатологического обследования, подобраны лесные выделы 26 рубок 2014 г. (табл. 1), расположенные в лесном районе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов Пермского края. Район занимает южную часть региона и характеризуется наибольшей интенсивностью нарушений. Участки расположены в условиях самых распространенных в исследуемом лесном районе типов леса: ельник зеленомошный, ельник кисличный и ельник липовый. В пределах рассмотренной территории (Чайковский, Еловский, Чагинский, Осинский, Большесосновский, Оханский и Березовский муниципальные округа) также подобраны «контрольные» участки, в пределах которых усыхание деревьев ели не зафиксировано.

Оценка санитарного состояния елового древостоя выполнена в соответствии классификацией, представленной в Правилах санитарной безопасности в лесах (Постановление Правительства РФ от 09.12.2020 г. № 2047).

Сведения о количестве подроста предварительной генерации приводятся в соответствии с материалами актов

предоставляет возможности для отслеживания изменений растительного покрова [9, 10, 11]. Для мониторинга состояния растительности наиболее широко используемым показателем является нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) [12, 13, 14].

Индекс отражает количество фотосинтетически активной растительной биомассы и широко применяется для количественного анализа растительного покрова, включая процессы естественного зарастания ландшафтов [15]. При этом следует отметить, что NDVI более информативен для участков, на которых произрастают лиственные леса [15, 16]. Дешифровать произрастание еловых древостоев возможно по зимним снимкам с помощью значений яркости красного канала [17]. Указанное позволит установить, какими породами возобновляются рубки и произошла ли смена пород.

Научные работы по мониторингу зарастания рубок усохших ельников дистанционными методами практически не проводились, что свидетельствует о новизне исследования. В этом контексте целью исследования является оценка динамики естественного возобновления рубок усохших ельников, расположенных в зоне хвойно-широколиственных лесов Пермского края, с помощью данных дистанционного зондирования Земли.

лесопатологических обследований. При этом следует отметить, что в документах учтен подрост темной хвойной породы. Оценка достаточности подроста для естественного лесовосстановления путем мероприятий по сохранению подроста проведена согласно шкале, представленной в

действующих Правилах лесовосстановления (Приказ МПР РФ от 29.12.2021 г. № 1024).

Ниже приводится описание типов леса, послуживших объектами исследования (Основные положения организации и развития лесного хозяйства Пермской области. Т. 1. – Пермь, 2000):

Ельник зеленомошный (Е.з.м.). Почвы под насаждениями ельника зеленомошного глубокоподзолистые малогумусные суглинистые. В составе древостоев преобладают ель и пихта. Средний класс бонитета – III (II).

Ельник кисличный (Е.к.). Указанный тип леса формируется на неглубокоподзолистых среднегумусных суглинистых почвах. Распространенными породами, составляющими древостой, являются ель, пихта и береза. Средний класс бонитета – II (III).

Ельник липовый (Е.л.п.). Почвы ельника липового дерново-подзолистые среднегумусные суглинистые. В составе древостоев участвуют ель,

пихта, липа, береза. Средний класс бонитета – II (III).

В представленных выше описаниях приводятся наиболее часто встречающиеся средние значения классов бонитета в пределах Пермского края.

Преобладающая часть вырубок (24 выдела из 26) находится в условиях зеленомошного и кисличного типов леса, что объясняется значительной подверженностью насаждений указанных типов леса усыханию [5]. В то же время насаждения ельника липового представлены всего двумя участками, что, в свою очередь, объясняется

их повышенной устойчивостью [5]. По каждому исследуемому типу леса подобрано по одному фоновому участку. Рубки в пределах контрольных участков, количество которых составило 3 штуки, также проведены в 2014 году (табл. 2). Сведения о сплошных рубках спелых и перестойных насаждений, проведенных в 2014 году, получены из лесных деклараций. Большинство сплошных рубок в указанный период на исследуемой территории проведено в лиственных насаждениях, чем объясняется небольшое количество подобранных контрольных участков.

Таблица 1

Характеристика исследуемых вырубок усохших ельников

Table 1

Characteristics of the studied clear-cuts sites of dried-up spruce forests

Characteristics of the studied clear-cuts sites of dried-up spruce forests								
№ No.	Год начала усыхания Year of drying out	Площадь, га Area, ha	Доля участия ели в составе древостоев до рубки, % Proportion of spruce in the stand composition before logging, %	Оценка санитарного состояния елового древостоя Assessment of the sanitary condition of the spruce stand		Количество подроста под пологом древостоя до рубки, шт./га Number of understory regeneration beneath the forest canopy before logging, pcs/ha	Оценка достаточности подроста для естественного лесовосстановления путем мероприятий по сохранению подроста Assessment of the sufficiency of advance regeneration for natural forest regeneration through regeneration-preservation measures	
1	2	3	4	5		6	7	
Тип леса – Ельник кисличный The type of forest – Sorrel spruce forest								
1	2010	1,7	60	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
3	2010	3,6	40	Погибший	Dead	2000	Достаточно	Enough
5	2013	4,5	50	Погибший	Dead	2000	Достаточно	Enough
6	2011	1,8	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
8	2009	2,7	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
15	2013	8,4	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
16	2011	1,8	40	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
17	2013	1,8	40	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
18	2013	3,7	40	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
20	2013	7,9	70	Усыхающий	Drying	0	Отсутствует	Absent
21	2011	2,1	40	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
22	2009	5,9	50	Усыхающий	Drying	2000	Достаточно	Enough
Тип леса – Ельник липовый The type of forest – Linden spruce forest								
2	2013	8,5	70	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
14	2011	1,6	40	Усыхающий	Drying	2000	Достаточно	Enough
Тип леса – Ельник зеленомошный The type of forest – Green moss spruce forest								
4	2011	2,4	50	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
7	2010	1,9	50	Погибший	Dead	3500	Достаточно	Enough
9	2009	5,9	80	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
10	2009	10,9	50	Усыхающий	Drying	2500	Достаточно	Enough
1	2	3	4	5		6	7	
11	2010	3,9	40	Усыхающий	Drying	2000	Достаточно	Enough
12	2010	9,3	50	Усыхающий	Drying	1500	Недостаточно	Not enough
13	2011	8,5	60	Усыхающий	Drving	1500	Недостаточно	Not enough

19	2013	4,1	50	Погибший Dead	3000	Достаточно Enough
23	2011	2,4	60	Усыхающий Drying	3000	Достаточно Enough
24	2010	5,9	70	Сильно ослабленный Severely weakened	0	Отсутствует Absent
25	2009	9,6	55	Усыхающий Drying	4000	Достаточно Enough
26	2013	4,9	60	Усыхающий Drying	2000	Достаточно Enough

Источник: Данные актов лесопатологического обследования

Source: Data from the reports of forest pathology research

Таблица 2

Характеристика исследуемых контрольных вырубок

Table 2

Characteristics of the studied control clear-cuts sites

№ No.	Площадь, га Area, ha	Доля участия ели в составе древостоев до рубки, % Proportion of spruce in the stand composition before logging, %	Оценка санитарного состояния елового древостоя Assessment of the sanitary condition of the spruce stand	Количество подроста под пологом древостоя до рубки, шт./га Number of understory regeneration beneath the forest canopy before logging, pcs/ha	Оценка достаточности подроста для естественного лесовосстановления путем мероприятий по сохранению подроста Assessment of the sufficiency of advance regeneration for natural forest regeneration through regeneration-preservation measures
1	2	3	4	5	6
Тип леса – Ельник зеленомошный The type of forest – Green moss spruce forest					
1	2,7	70	Здоровый Healthy	1000	Недостаточно Not enough
Тип леса – Ельник липовый The type of forest – Linden spruce forest					
2	14,7	50	Здоровый Healthy	1000	Недостаточно Not enough
Тип леса – Ельник кисличный The type of forest – Sorrel spruce forest					
3	2,0	60	Здоровый Healthy	1000	Недостаточно Not enough

Источник: Данные актов лесопатологического обследования

Source: Data from the reports of forest pathology research

На территории объектов исследований искусственное лесовосстановление не осуществлялось, участки были оставлены под естественное зарастивание. Площадь пройденных сплошными санитарными рубками территорий варьирует от 1,6 до 10,9 га, а сплошными рубками спелых и перестойных лесных насаждений – от 2,0 до 14,7 га (что соответствует участкам от 17 до 119, от 22 до 161 пикселей снимка соответственно).

Для анализа многолетней динамики зарастания вырубок усохших ельников были использованы данные спутниковой съемки Landsat, полученные через открытый сервис Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) за период 2014–2025 гг. На основе спутниковых изображений были определены долгосрочные изменения общераспространенного нормализованного разностного индекса растительности NDVI [14]. Также в пределах вырубок рассчитаны средние значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в красном канале. В качестве минимально допустимого для анализа размера анализируемых объектов была принята площадь 1,5 га, что включает 17 пикселей Landsat. Для минимизации влияния

сезонных вариаций растительности, преимущественно рассматривались летние снимки в период со второй декады июня по первую декаду августа, что можно отнести к одной фазе вегетационного сезона – максимального развития фитомассы. Для отдельных лет (2017 и 2022 г.) из-за отсутствия спутниковых снимков, удовлетворяющих требованиям по облачности и покрытию, в виде исключения использовались данные второй декады августа. Данный интервал относится к вегетационному сезону и предшествует фазе активного осеннего снижения NDVI. Самая ранняя используемая дата снимка вегетационного сезона – 14 июня, а самая поздняя – 31 августа. Показатель рассчитывали по данным уровня обработки Level-2, для которых атмосферная коррекция уже выполнена с применением алгоритмов LEDAPS и LaSRC (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Статистическая обработка данных выполнена в среде Python (с использованием библиотек Pandas и PyMannKendall). Расчет линейных трендов значений NDVI и КСЯ для каждой рубки и оценка их значимости проведены

с использованием теста Манна-Кендалла. В указанном тесте применяется показатель тау, который используется для определения тренда в данных. Значение тау может меняться от -1 до 1, что указывает на отрицательную или положительную монотонность соответственно. По каждому тренду рассчитаны значения наклонов (slope), которые выражаются в следующих единицах: NDVI/год или КСЯ/год в зависимости от анализируемого показателя. Статистическое значимое различие между выборками значений NDVI пикселей оценивалось с помощью U-критерия Манна – Уитни. Предварительно выборки были проверены на наличие/отсутствие нормальности распределения с помощью теста Шапиро – Уилка. С целью статистической оценки динамики изменений средних значений NDVI на вырубках выполнен расчет ежегодных базисных темпов прироста относительно года рубки (2014 года). Для экспериментальных участков рассчитаны средние значения темпов прироста по типам леса.

Результаты

Большинство еловых насаждений начало усыхать в период 2010-2013 годов, что, по мнению авторов, объясняется аномальной жарой 2010 года [18]. У большинства участков, начавших усыхать в 2010-2011 годах (12 лесных выделов из 14), значения КСЯ в красном канале с течением времени увеличивались в среднем на 23,6%, что свидетельствует о том, что процесс усыхания активно развивался до рубки. У лесных насаждений, усыхание которых начало происходить в 2009 году, в 2010 году значение КСЯ уменьшилось, а в последующие годы снова стало возрастать, что свидетельствует о том, что процесс усыхания через год продолжился в связи с аномальной жарой 2010 года.

До санитарной рубки на территории исследуемых выделов произрастали смешанные по породному составу леса. В составе насаждений

произрастали еловые древостои, подвергшиеся гибели в результате воздействия короеда-типографа. Доля участия ели в составе насаждения варьировала от 40 до 80%. Санитарное состояние еловых древостоев до вырубki варьировало от сильно ослабленных до погибших, при этом преобладали усыхающие еловые древостои. Среди представленной выборки участков, сильнее усыхали древостои, которые произрастали в условиях ельника кисличного. На контрольных участках до вырубki также произрастали преимущественно смешанные еловые насаждения с преобладанием елового древостоя. Доля участия ели в составе древостоев варьировала от 50 до 70%. Наибольшее количество подроста предварительной генерации произрастало на участках, расположенных в условиях ельника зеленомошного: 67% насаждений зеленомошного типа леса характеризовалось достаточным количеством подроста для успешного лесовосстановления после рубки.

Анализ временных рядов NDVI за период 2014–2025 г. с использованием непараметрического критерия Манна-Кендалла выявил преобладание положительных трендов при оценке динамики восстановления как вырубok усохших ельников, так и контрольных лесных участков, что свидетельствует о том, что вырубki зарастают преимущественно лиственными породами (табл. 3).

Статистически значимый возрастающий тренд NDVI ($p < 0,05$) на территории вырубok усохших ельников выявлен в 77% случаев. Для этих участков значения Тау изменялись в диапазоне 0,43–0,74, что указывает на умеренную и высокую согласованность положительного тренда. Значения наклона линейного тренда для статистически значимых участков варьируют в диапазоне 0,012–0,027, что отражает стабильное повышение фотосинтетической активности в течение исследуемого периода.

Таблица 3

Результаты анализа временных рядов индекса NDVI и КСЯ в красном канале для объектов исследования с использованием непараметрического критерия Манна-Кендалла (2014 – 2025 годы)

Table 3

Results of the time-series analysis of the NDVI and SBC in the red band for the study sites using the non-parametric Mann–Kendall test (2014–2025)

Показатель Indicator	NDVI		КСЯ в красном канале SBC in the red band	
	Значение (вырубki усохших ельников) The value (Dried-up spruce clear-cuts)	Значение (контроль) The value (Control)	Значение (вырубki усохших ельников) The value (Dried-up spruce clear-cuts)	Значение (контроль) The value (Control)
1	2	3	4	5
Количество участков Number of plots	26	3	26	3

Участки со значимым ростом NDVI и со значимым снижением КСЯ в красном канале ($p < 0,05$) Sites with a significant increase in NDVI and a significant decrease in SBC in the red band ($p < 0.05$)	20 (77%)	3 (100%)	10 (38%)	0
Участки без значимого тренда ($p > 0,05$) Sites with no significant trend ($p > 0.05$)	6 (23%)	-	16 (62%)	3 (100%)
Диапазон значений Тау* Range of Tau values	0,43 – 0,74	0,47 – 0,58	-0,64 – (-0,93)	-
Средние значения Тау* Average Tau values	0,51	0,53	-0,72	-
Диапазон значений наклона тренда, NDVI/год и КСЯ/год* Range of trend slope values, NDVI/year and SBC/year	0,012 – 0,027	0,007 – 0,022	-0,036 – (-0,070)	-
Максимальные значения Тау и наклона тренда Maximum values of Tau and trend slope**	№№ 9, 19	№ 2	№№ 2, 20, 23	-
Отсутствие статистически значимого тренда No statistically significant trend**	№№ 3, 5, 7, 23, 25, 26	-	№№ 1, 4, 5, 7-9, 11, 12, 15-19, 21, 24, 26	№№ 1, 2, 3
Общая направленность изменений General trend direction	Преимущественно возрастающая Predominantly increasing	Преимущественно возрастающая Predominantly increasing	Преимущественно убывающая Predominantly decreasing	-

Примечание: * для статистически значимых трендов; ** номера участков из таблиц 1, 2

Note: * for statistically significant trends; ** plot numbers from tables 1, 2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Author's calculations

Наиболее высокие значения Тау зафиксированы на участках №№ 9, 19, что свидетельствует о наиболее устойчивом росте индекса NDVI и успешном возобновлении преимущественно лиственными породами. При этом указанные участки характеризуются разным количеством подроста темнохвойных пород предварительной генерации: не достаточным и достаточным количеством для успешного лесовосстановления.

Анализ временных рядов значений КСЯ в красном канале за исследуемый период выявил наличие статистически значимых ($p < 0,05$) убывающих трендов в 38% случаев. Указанное свидетельствует, что в составе молодого поколения на территории 10 вырубок произрастает ель. Для данных участков характерны умеренная согласованность отрицательного тренда (значения Тау варьируют от -0,64 до -0,93) и медленный рост молодых деревьев ели (значения наклона линейного тренда изменяются от -0,036 до -0,070).

Для 7 участков (27%) выявлено наличие обоих статистически значимых трендов, что, по мнению авторов, указывает на смешанный состав

произрастающего на вырубках молодняка: имеются как темнохвойные, так и лиственные породы. У 3 вырубок усохших ельников (12%) выявлен только статистически значимый убывающий тренд значений КСЯ, соответственно, на их территории в составе молодого поколения господствует ель. При этом следует отметить, что все три участка характеризуются достаточным количеством темнохвойного подроста предварительной генерации.

Отсутствие статистически значимого тренда NDVI ($p > 0,05$) выявлено в 23% случаев. Эти участки характеризуются относительно низкими значениями Тау (0,30-0,45) и малыми величинами наклона тренда, что указывает на стабильность значений индекса NDVI в течение исследуемого периода. Для 16 участков установлено отсутствие статистически значимого тренда КСЯ в красном канале ($p > 0,05$), что обозначает отсутствие или незначительную долю участия деревьев ели в составе растущего леса.

Отсутствие статистически значимого тренда по обоим показателям выявлено у 3 вырубок усохших ельников. Постоянство значений NDVI и

КСЯ в красном канале свидетельствует о том, что указанные вырубки после удаления погибшей древесной растительности не восстанавливаются ни темнохвойными, ни лиственными породами деревьев. Однако, для всех исследуемых вырубок усохших ельников зафиксирован рост индекса NDVI при сравнении абсолютных начальных значений рядов в 2014 и конечных значений в 2025 годах, что указывает на развитие травяного покрова после рубки. При этом следует отметить, что на территории данных участков до рубки произрастал подрост в достаточном для успешного возобновления количестве.

Для всех вырубок спелых и перестойных лесных насаждений (фоновые участки) также выявлен статистически значимый возрастающий тренд NDVI. Для них значения Tau составляют 0,47-0,58, а наклон тренда изменяется в диапазоне 0,007-0,022, что указывает на умеренное (у вырубок, расположенных в условиях зеленомошного и кисличного типов леса) и стабильное (у вырубки, расположенной в условиях липового типа леса) усиление фотосинтетической активности. У всех контрольных участков статистически значимый тренд значений КСЯ не выявлен, что объясняется

отсутствием или незначительным количеством молодых деревьев ели.

Анализ значений NDVI по типам леса среди вырубок усохших ельников свидетельствует, что более успешно лиственными породами восстанавливаются вырубки, расположенные в условиях липового типа леса: среднее значение NDVI указанного типа леса выше, чем аналогичные значения у вырубок, расположенных в условиях остальных типов леса (табл. 4). Также в условиях липового типа леса наиболее высокие значения наклона тренда, что свидетельствует об устойчивом увеличении фотосинтетической активности в течение исследуемого периода. По мнению авторов, указанное объясняется более благоприятными условиями произрастания.

Среди контрольных вырубок получились аналогичные результаты: самое высокое среднее значение NDVI и самое высокое значение наклона тренда у участка, также расположенного в условиях ельника липового. Таким образом, наиболее успешно лиственными породами зарастают вырубки, расположенные в условиях ельника липового: как вырубки усохших ельников, так и вырубки спелых и перестойных лесных насаждений.

Таблица 4

Средние значения NDVI, Tau и наклона тренда в условиях разных типов леса

Table 4

Mean NDVI values, Tau , and trend slope under different forest types

Тип леса The type of forest	Средние значения Average values		
	NDVI за 2025 год NDVI for 2025	Tau Tau	Наклон тренда Trend slope
Вырубки усохших ельников Dried-up spruce clear-cuts			
Е.зм. Green moss spruce forest	0,438±0,0063	0,538±0,0366	0,018±0,0010
Е.к. Sorrel spruce forest	0,427±0,0065	0,482±0,0092	0,017±0,0012
Е.лп. Linden spruce forest	0,462±0,0028	0,500±0,0128	0,025±0,0025
Контрольные вырубки Control clear-cuts			
Е.зм. Green moss spruce forest	0,399	0,583	0,008
Е.к. Sorrel spruce forest	0,414	0,466	0,007
Е.лп. Linden spruce forest	0,461	0,527	0,022

Примечание: ± - стандартная ошибка

Note: ± - standard error

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Author's calculations

Распределение значений КСЯ в красном канале по типам леса демонстрирует более успешное лесовосстановление елью в условиях зеленомошного типа леса, а менее успешное – в условиях липового (табл. 5). Кроме того, значение

Tau в насаждениях ельника зеленомошного указывает на более усиленный рост молодого поколения деревьев ели по сравнению с насаждениями других типов леса.

Таблица 5

Средние значения КСЯ в красном канале, Тау и наклона тренда в условиях разных типов леса

Table 5

Тип леса The type of forest	Средние значения Average values		
	КСЯ в красном канале за 2025 год SBC in the red band for 2025	Тау Tau	Наклон тренда Trend slope
Вырубки усохших ельников Dried-up spruce clear-cuts			
Е.зм. Green moss spruce forest	0,2741±0,0682	-0,696±0,0342	-0,052±0,0049
Е.к. Sorrel spruce forest	0,3253±0,0524	-0,750±0,0684	-0,048±0,0059
Е.лп. Linden spruce forest	0,4388±0,0721	-0,714±0,00	-0,063±0,0074

Примечание: ± - стандартная ошибка

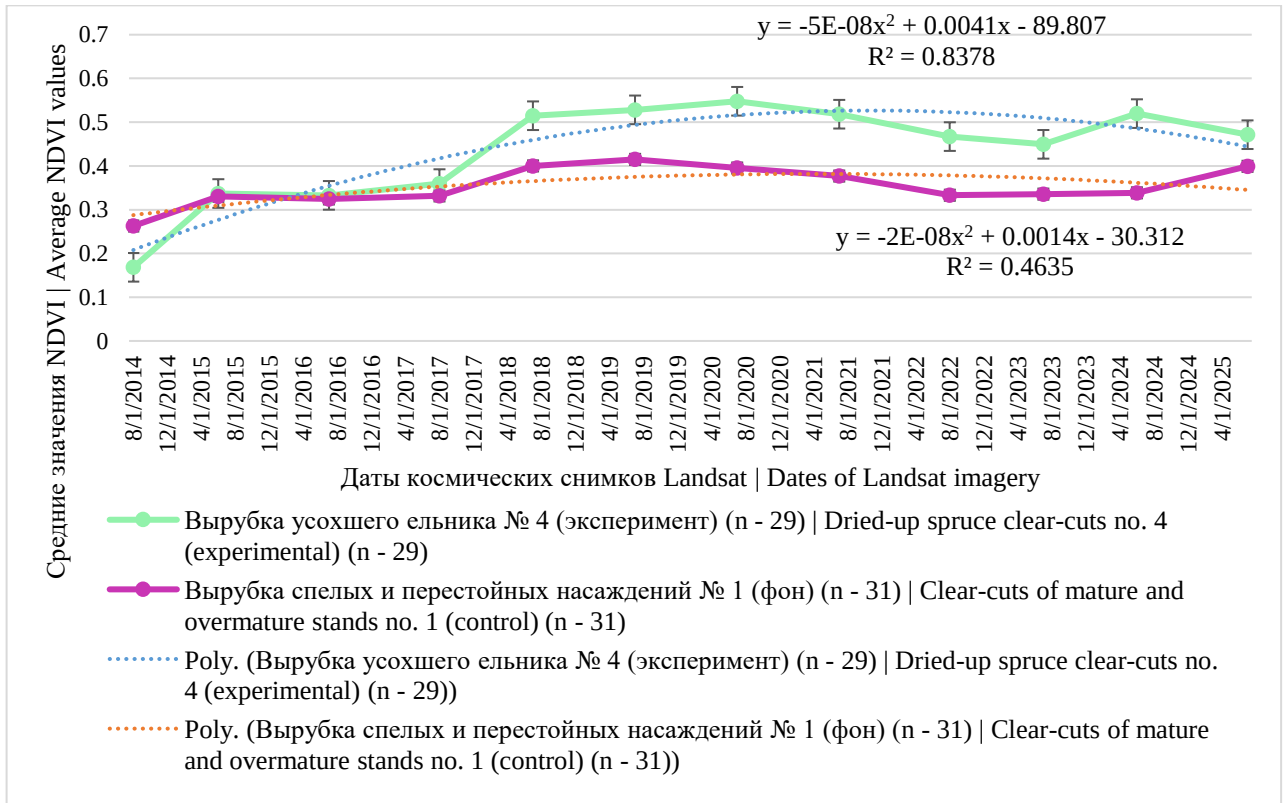
Note: ± - standard error

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Author's calculations

В связи с тем, что по фоновым участкам не выявлено статистически значимых трендов КСЯ в красном канале, динамика значений представлена только по NDVI. Сравнение изменений средних значений NDVI по годам в пределах экспериментального и фонового участков

представлено на примере насаждений ельника зеленомошного (рис. 1). U-тест Манна – Уитни зафиксировал наличие статистически значимых различий между двумя выборками за каждый год при $p \leq 0.05$.



Примечание: Планками отмечена стандартная погрешность

Note: The bars indicate the standard error

Рисунок 1. Динамика средних значений NDVI в период с 2014 по 2025 годы на примере вырубки усохших ельников № 4 (эксперимент) и вырубки спелых и перестойных насаждений (фон), расположенных в условиях ельника зеленомошного

Figure 1. Dynamics of mean NDVI values from 2014 to 2025 for dried-up spruce clear-cut №4 (experimental) and a clear-cut of mature and overmature stands (control) in green-moss spruce forest conditions

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Материалы рисунка 1 свидетельствуют, что вырубка усохших ельников восстанавливается активнее, в то время как вырубка спелых и перестойных насаждений – более умеренно. Кроме того, в промежутках между 2014 и 2015 годами, между 2017 и 2018 годами вырубка усохших ельников характеризуется высокой интенсивностью прироста средних значений NDVI: в 2015 году значение индекса увеличилось на 100,2% относительно 2014 года, а в 2018 – на 43,1% по сравнению с 2017 годом. В эти годы биомасса растений в период вегетации значительно увеличилась. Модели возобновления леса на указанных вырубках описываются полиномиальными функциями, при этом сильная объяснительная способность модели характерна для экспериментальной вырубки ($R^2 = 0,8378$), а для фоновой – умеренная объяснительная способность ($R^2 = 0,4635$).

Графики темпов прироста свидетельствуют (рис. 2), что в большинстве случаев минимальный

темпы прироста средних значений NDVI наблюдается в год, следующий за годом рубки: в данном случае в 2015 году. Темпы прироста средних значений NDVI у вырубок усохших ельников, расположенных в условиях зеленомошного типа леса, выше на 61,6-150,2%, чем у вырубок спелых и перестойных насаждений, расположенных в аналогичных условиях. Подобная ситуация наблюдается и в условиях кисличного типа леса: у вырубок усохших ельников темпы прироста выше на 83,2-194,8% по сравнению с контролем. Указанное свидетельствует, что в условиях зеленомошного и кисличного типов леса вырубки усохших ельников зарастают более интенсивно, чем вырубки спелых и перестойных насаждений. Указанный вывод подтверждает также U-тест Манна – Уитни: при $p \leq 0.05$ различия между экспериментальными и контрольными группами в указанных типах леса статистически значимы.

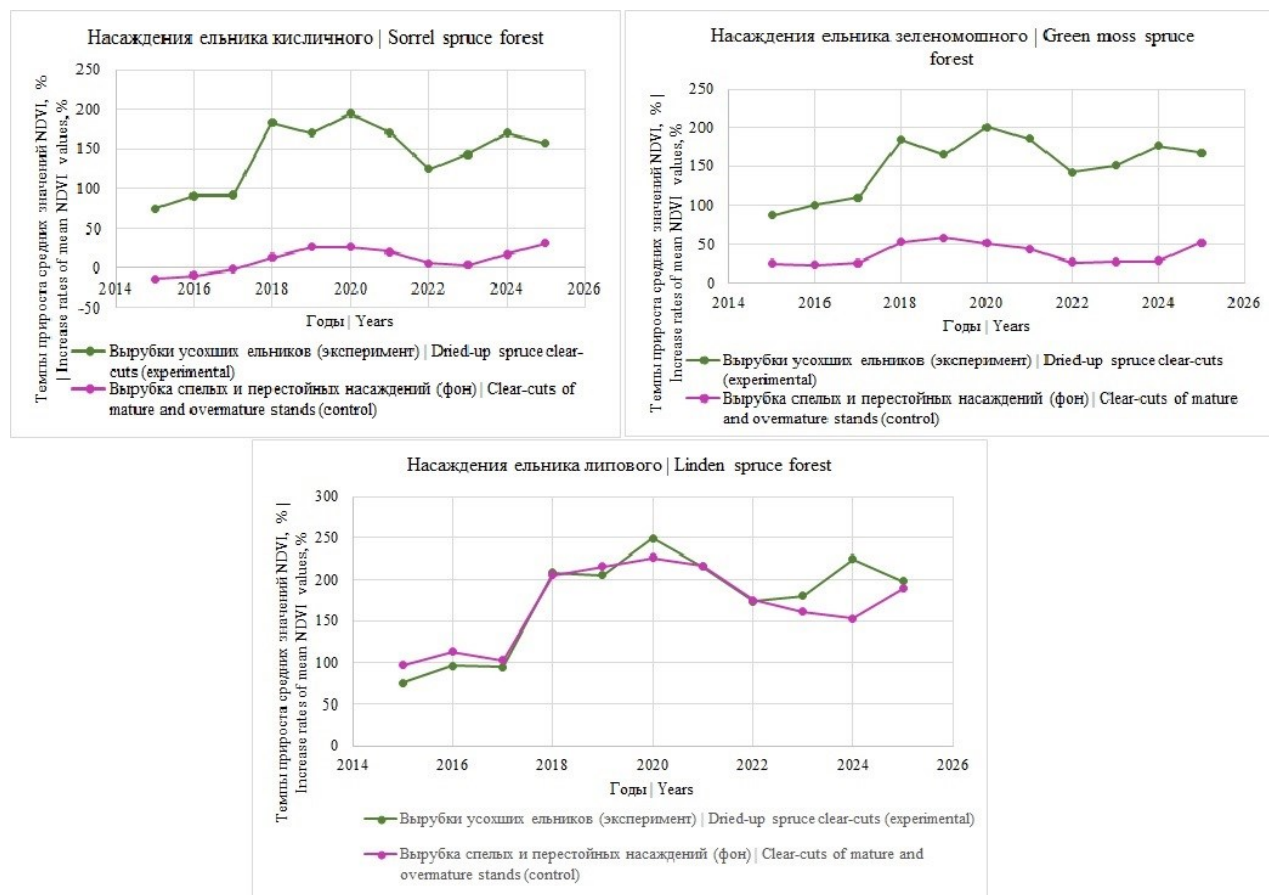


Рисунок 2. Интенсивность прироста средних значений NDVI относительно года рубки у вырубок разных типов леса

Figure 2. Rate of increase in mean NDVI values relative to the year of logging for clear-cuts in different forest types

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

В условиях липового типа леса темпы прироста между видами вырубок значительно не отличаются: экспериментальные и фоновые участки восстанавливаются интенсивно, что подтверждается U-тестом Манна – Уитни при $p \leq 0.05$: статистически значимое различие между выборками не установлено. Темпы прироста у вырубок усохших ельников варьируют от 75,3 до 249,2%, а у вырубок спелых и перестойных насаждений – от 97,2 до 225,9%.

Для того, чтобы установить, имеется ли взаимосвязь между количеством подроста темнохвойных пород до рубки и количеством молодняка ели на вырубках усохших ельников, был проведен корреляционный анализ между количеством подроста темнохвойных пород предварительной генерации и значениями КСЯ в

Обсуждение

Результаты исследований свидетельствуют, что в условиях зеленомошного и кисличного типов леса вырубки, в пределах которых произрастали усыхающие еловые древостои, лиственными породами восстанавливаются быстрее, чем вырубки, на которых произрастали здоровые ельники. По мнению авторов, указанное объясняется относительно низкими изначальными значениями вегетационного индекса по сравнению с конечными данными временного ряда и более благоприятными условиями произрастания на вырубках усохших ельников. В результате гибели деревьев разлагается опавшая еловая хвоя, и как следствие накапливаются дополнительные источники питательных веществ, таких, как калий и фосфор [19].

Ни на одном из фоновых участков не выявлено статистически значимого снижения индекса NDVI, что подтверждает стабильное и здоровое состояние растительного покрова на протяжении всего исследуемого периода, а также возобновление лиственными породами.

Отсутствие лесовозобновления на 3 вырубках, на которых отсутствует статистически значимый тренд по обоим показателям, а также слабая связь между количеством темнохвойного подроста до рубки и участием ели в составе лесовосстановления после рубки, по мнению авторов, могут быть вызваны антропогенными факторами: несоблюдение условий рубки. В частности, в процессе рубки были повреждены молодые растения, нарушен напочвенный покров, уплотнена почва. Насаждения на указанных участках до вырубки обладали разными таксационными характеристиками, что свидетельствует о том, что количественные и

Результаты данного исследования могут быть использованы при оценке лесовозобновления дистанционными методами.

красном канале по снимкам 2025 года, являющихся наиболее информативными при дешифрировании произрастания ели. Анализ проведен по данным всех вырубок без учета влияния отдельных факторов.

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о слабой отрицательной связи (коэффициент корреляции между выборками составляет $-0,1842$) между исследуемыми показателями: чем больше количество подроста темнохвойных пород предварительной генерации, тем меньше значения КСЯ в красном канале. Чем ниже значения КСЯ в красном канале, тем больше биомасса деревьев ели. Соответственно, участие в составе лесовозобновления молодняка ели на вырубках усохших ельников слабо зависит от количества подроста темнохвойных пород до рубки. Качественные характеристики усохших еловых древостоев до рубки не оказывают влияния на последующее лесовосстановление.

Согласно результатам исследований, господство деревьев ели в составе молодого поколения на вырубках усохших ельников зафиксировано в 38% случаев, а на контрольных – не отмечено. Таким образом, в большинстве случаев в Пермском крае происходит смена пород с более ценных темнохвойных на менее ценные лиственные.

Высокие значения базисных темпов прироста NDVI относительно 2014 года, достигающие 249,2%, объясняются тем, что лиственные породы, о произрастании которых свидетельствуют значения NDVI, в частности, светолюбивые породы береза и осина, которые появляются первыми на вырубках, являются быстрорастущими породами, способными ежегодно увеличиваться на 2 метра в высоту [20, 21]. За счет роста лиственных пород быстро увеличивается биомасса.

Исследованиями других авторов подтверждается частая смена пород на менее ценные мягколиственные леса при способности темнохвойных лесов к естественному самовосстановлению после крупных нарушений [7]. Например, на территории Центрально-Лесного заповедника, находящегося в Тверской области, после распада ельников смена пород происходит в 74% случаев [22]. Зафиксировано также формирование редколесий, состоящих из деревьев пихты. При этом М.Ю. Пукинская [7] отмечает, что в связи с большими масштабами усыхания возможен недостаток семян усыхающей породы, в связи с чем актуально сохранять хвойный подрост предварительной генерации.

Авторами планируется в дальнейшем отслеживать динамику увеличения растительной биомассы с течением времени на указанных в данном исследовании участках.

Заключение

Таким образом, вырубки усохших ельников преимущественно восстанавливаются лиственными породами: в 77% случаев выявлен положительный статистически значимый возрастающий линейный тренд NDVI ($p < 0,05$). Произрастание на вырубках в составе молодого поколения деревьев ели зафиксировано в 38% случаев, что подтверждается статистически значимым убывающим трендом КСЯ в красном канале. При этом в 27% случаев выявлено наличие обоих статистически значимых трендов, что, указывает на смешанный состав произрастающего на вырубках молодняка древесных пород. Лесовосстановление с господством ели зафиксировано на территории только 12% вырубок усохших ельников. Половина указанных вырубок возобновляется лиственными породами, то есть в 50% случаев происходит смена пород.

Анализ значений NDVI по типам леса свидетельствует, что более успешно лиственными породами зарастают вырубки, расположенные в

условиях ельника липового: как вырубки усохших ельников, так и вырубки спелых и перестойных лесных насаждений. Распределение значений КСЯ в красном канале по типам леса демонстрирует более успешное лесовосстановление елью в условиях зеленомошного, а менее успешное – в условиях липового типов леса.

В условиях зеленомошного и кисличного типов леса для вырубок усохших ельников характерно стабильное повышение значений NDVI в течение исследуемого периода (2014-2025 годы). А для вырубок, на территории которых проведены сплошные рубки спелых и перестойных лесных насаждений, характерно умеренное усиление значений NDVI. Вырубки, на территории которых произрастали здоровые древостои, восстанавливаются медленнее. По мнению авторов, данная закономерность может быть объяснена относительно низкими исходными значениями NDVI во временном ряду для зарастающих вырубок усохших ельников, а также более благоприятными условиями произрастания, связанными с повышением доступности питательных веществ в почве за счет разложения опавшей еловой хвои после усыхания древостоя.

Список литературы

1. Агафонова Т.Н., Итешина Н.М., Залесов С.В. Состояние еловых насаждений в Удмуртской Республике при меняющемся климате // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 2 (82). – С. 36-42. – DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.67>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82539202>.
2. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Тишков А.С. Ель европейская как лесообразователь на Смоленско-Московской возвышенности // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2024. – Т. 28. – № 1. – С. 5–13. – DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-5-13. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=63776263>.
3. Hlásny T., König L., Krokene P., Lindner M., Montagné-Huck C., Müller J., Qin H., Raffa K.F., Schelhaas M.-J., Svoboda M., Viiri H., Seidl R. Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management. Current Forestry Reports. 2021; 7: 138–165. – DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x.
4. Чебакова Н.М., Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Сенашова В.А. В поисках фактора “икс”: обзор публикаций по проблеме усыхания темнохвойных лесов Северной Евразии // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 5. – С. 123-140. – DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-123-140. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49308019&ysclid=mmojp8sdc199641569>.
5. Ivanchina L., Kovalev V., Makurin D., Poplyakov E., Solontsov O., Korotaeva N. The influence of the type of forest and the type of forest growing conditions on the stability of spruce stands in the zone of coniferous-deciduous forests of the Perm Krai. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2023; 15(4): 92-111. DOI: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-92-111>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57709453>.
6. Nardi D., Jactel H., Pagot E., Samalens J.-C., Marini L. Drought and stand susceptibility to attacks by the European spruce bark beetle: A remote sensing approach. Agricultural and Forest Entomology. 2023; 25(1): 119-129. DOI: 10.1111/afe.12536.
7. Пукинская М.Ю. Реконструкция динамики темнохвойных лесов Тебердинского заповедника и перспективы их естественного восстановления после массового усыхания // Поволжский экологический журнал. – 2022. – № 4. – С. 431–451. DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-431-451>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49948485&ysclid=mmokvr7oto15650276>.
8. Isoaho A., Elo M., Marttila H., Rana P., Lensu A., Räsänen A. Monitoring changes in boreal peatland vegetation after restoration with optical satellite imagery. The Science of the total environment. 2024; 957: 177697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177697>.
9. Mashala M.J., Dube T., Mudereri B.T., Ayisi K.K., Ramudzuli M.R. A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments. Remote Sensing. 2023; 15(16): 3926. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15163926>.

10. Подрядчикова Е.Д., Мартынова Н.Г., Кустышева И.Н., Раева И.В. Мониторинг растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2025. – Т. 68. – № 4 (406). – С. 420-423. – DOI: 10.55186/25876740_2025_68_4_420. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82885663>.

11. Ikkala L., Ismail I., Wolff F., Marttila H., Ronkanen A.-K., Alekseychik P., Rana P., Kohv M., Tahvanainen T., Tolvanen A., Haghighi A.T., Kumpula T., Osborne C., Ilmonen J., Haapalehto T., Kløve B., Räsänen A. Remote sensing applications for monitoring restoration outcomes in boreal forestry-drained peatlands - Reviewed applications and future potential. *Remote Sensing of Environment*. 2026; 333: 115093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115093>.

12. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* 2021; 32: 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.

13. Pei F., Zhou Y., Xia Y. Application of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Extreme Precipitation Change. *Forests*. 2021; 12(5): 594. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050594>.

14. Asam S., Eisfelder C., Hirner A., Reiners P., Holzwarth S., Bachmann M. AVHRR NDVI Compositing Method Comparison and Generation of Multi-Decadal Time Series—A TIMELINE Thematic Processor. *Remote Sens.* 2023; 15(6): 1631. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15061631>.

15. Балдина Е.А., Илюшина П.Г., Васильев П.К. Оценка космических снимков разного спектрального разрешения для анализа состояния растительного покрова // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2025. – Т. 31. – Ч. 2. – С. 5–20. – DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-5-20. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88577486>.

16. Drechsel J., Forkel M. Remote sensing forest health assessment – a comprehensive literature review on a European level. *Central European Forestry Journal*. 2025; 71(1): 14-39. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2024-0022>.

17. Pivovar M., Näsi R., Honkavaara E., Blaženec M., Skvarenina J., Modlinger R., Rožnovský J., Jakuš R. Spectral signatures discrimination of Norway spruce trees under experimentally induced drought and acute thermal stress using hyperspectral imaging. *Forest Ecology and Management*. 2025; 586: 122692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122692>.

18. Попова В.В., Бокучава Д.Д., Матвеева Т.А. Экстремальная засуха на восточно-европейской равнине в период потепления середины XX столетия: климатические характеристики и аналоги в условиях современного климата // Аридные экосистемы. – 2023. – Т. 29. – № 2 (95). – С. 3-11. – DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-3-11. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54312207>.

19. Иванова Е.А., Данилова М.А., Смирнов В.Э., Ершов В.В. Сравнительная оценка скорости разложения растительного опада в еловых и сосновых лесах на северном пределе распространения // Вопросы лесной науки. – 2023. – Т. 6. – № 3. – Статья № 132. – DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67224208>.

20. Багаев Е.С., Чудецкий А.И., Макаров С.С. Оценка возможности использования быстрорастущих форм осины для закладки лесосырьевых плантаций с коротким оборотом рубки // Лесохозяйственная информация. – 2023. – № 1. – С. 55–67. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.05. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50372387>.

21. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Часовских В.П. Сравнительный мета-анализ аллометрических моделей биомассы быстрорастущих лиственных пород // Биосфера. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 7-20. – DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i1.789>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53211437&ysclid=mnaly8c9lk71965818>.

22. Pukinskaya M.Yu. *Tree Species Change in Nemoral Spruce Forests of the Central Forest Reserve*. *Biology Bulletin*. 2021; 48(10): 1912-1923. DOI: 10.1134/S1062359021100216.

References

1. Agafonova T.N., Iteshina N.M., Zalesov S.V. *Sostoyaniye elovykh nasazhdeniy v Udmurtskoj Respublike pri menyayushchemsya climate* [State of spruce stands in the Udmurt Republic under the changing climate]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 2(82): 36-42. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_2_36-42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82539202>.

2. Merzlenko M.D., Melnik P.G., Tishkov A.S. *El' evropeyskaya kak lesoobrazovatel' na Smolensko-Moskovskoy vozvyshennosti* [Forest forming species of European spruce in Smolensk-Moscow uplands]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin = Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2024; 28(1): 5–13. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-5-13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=63776263>.

3. Hlásny T., König L., Krokene P., Lindner M., Montagné-Huck C., Müller J., Qin H., Raffa K.F., Schelhaas M.-J., Svoboda M., Viiri H., Seidl R. *Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management*. *Current Forestry Reports*. 2021; 7: 138–165. DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x.

4. Chebakova N.M., Bazhina E.V., Parfenova E.I., Senashova V.A. *V poiskah faktora "iks": obzor publikacij po probleme usyhaniya temnohvojnyh lesov Severnoj Evrazii* [In search of an x factor: a review of publications on the issue of dark-needled forest decline/dieback in Northern Eurasia]. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2022; 5: 123-140. (In Russ.). DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-123-140. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49308019&ysclid=mmojpa8sdc199641569>.
5. Ivanchina L., Kovalev V., Makurin D., Poplyakov E., Solontsov O., Korotaeva N. *The influence of the type of forest and the type of forest growing conditions on the stability of spruce stands in the zone of coniferous-deciduous forests of the Perm Krai*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023; 15(4): 92-111. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-92-111>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57709453>.
6. Nardi D., Jactel H., Pagot E., Samalens J.-C., Marini L. *Drought and stand susceptibility to attacks by the European spruce bark beetle: A remote sensing approach*. *Agricultural and Forest Entomology*. 2023; 25(1): 119-129. DOI: 10.1111/afe.12536.
7. Pukinskaya M.YU. *Rekonstrukciya dinamiki temnohvojnyh lesov Teberdinskogo zapovednika i perspektivy ih estestvennogo vosstanovleniya posle massovogo usyhaniya* [Reconstruction of the dynamics of the dark coniferous forests of the Teberdinsky Nature Reserve and prospects for their natural recovery after mass drying out]. *Povolzhskij ehkologicheskij zhurnal = Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2022; 4: 431-451. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-431-451>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49948485&ysclid=mmokvr7oto15650276>.
8. Isoaho A., Elo M., Marttila H., Rana P., Lensu A., Räsänen A. *Monitoring changes in boreal peatland vegetation after restoration with optical satellite imagery*. *The Science of the total environment*. 2024; 957: 177697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177697>.
9. Mashala M.J., Dube T., Mudereri B.T., Ayisi K.K., Ramudzuli M.R. *A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments*. *Remote Sensing*. 2023; 15(16): 3926. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15163926>.
10. Podryadchikova E.D., Martynova N.G., Kustysheva I.N., Raeva I.V. *Monitoring rastitel'nogo pokrova na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Vegetation cover monitoring based on earth remote sensing data]. *Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal = International agricultural journal*. 2025; 4 (406): 420-423. (In Russ.). DOI: 10.55186/25876740_2025_68_4_420. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82885663>.
11. Ikkala L., Ismail I., Wolff F., Marttila H., Ronkanen A.-K., Alekseychik P., Rana P., Kohv M., Tahvanainen T., Tolvanen A., Haghighi A.T., Kumpula T., Osborne C., Ilmonen J., Haapalehto T., Kløve B., Räsänen A. *Remote sensing applications for monitoring restoration outcomes in boreal forestry-drained peatlands - Reviewed applications and future potential*. *Remote Sensing of Environment*. 2026; 333: 115093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115093>.
12. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. *A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing*. *Journal of Forestry Research*. 2021; 32: 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.
13. Pei F., Zhou Y., Xia Y. *Application of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Extreme Precipitation Change*. *Forests*. 2021; 12(5): 594. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050594>.
14. Asam S., Eisfelder C., Hirner A., Reiners P., Holzwarth S., Bachmann M. *AVHRR NDVI Compositing Method Comparison and Generation of Multi-Decadal Time Series—A TIMELINE Thematic Processor*. *Remote Sens*. 2023; 15(6): 1631. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15061631>.
15. Baldina E.A., Ilyushina P.G., Vasiliev P.K. *Ocenka kosmicheskikh snimkov raznogo spektral'nogo razresheniya dlya analiza sostoyaniya rastitel'nogo pokrova* [Evaluation of satellite images with different spectral resolution for analyzing the vegetation cover condition]. *Interkarto. InterGIS = InterCarto. InterGIS*. 2025; 31: 5-20. (In Russ.). DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-5-20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88577486>.
16. Drechsel J., Forkel M. *Remote sensing forest health assessment – a comprehensive literature review on a European level*. *Central European Forestry Journal*. 2025; 71(1): 14-39. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2024-0022>.
17. Pivovar M., Näsi R., Honkavaara E., Blaženec M., Skvarenina J., Modlinger R., Rožnovský J., Jakuš R. *Spectral signatures discrimination of Norway spruce trees under experimentally induced drought and acute thermal stress using hyperspectral imaging*. *Forest Ecology and Management*. 2025; 586: 122692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122692>.
18. Popova V.V., Bokuchava D.D., Matveeva T.A. *Ehkstremal'naya zasuha na vostochno-evropejskoj ravnine v period potepleniya serediny HH stoletiya: klimaticheskie harakteristiki i analogi v usloviyah sovremennogo klimata* [Extreme drought on the East European plain during the heat wave in the middle of the 20th century: climatic characteristics and analogues in the modern climate conditions]. *Aridnye ehkosistemy = Arid Ecosystems*. 2022; 2(95): 3-11. (In Russ.). DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-3-11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54312207>.
19. Ivanova E.A., Danilova M.A., Smirnov V.E., Ershov V.V. *Sravnitel'naya ocenka skorosti razlozheniya rastitel'nogo opada v elovyh i sosnovyh lesah na severnom predele rasprostraneniya* [Comparative assessment of the

decomposition rate of plant litterfall in spruce and pine forests at the northern distribution limit]. *Voprosy lesnoj nauki = Forest science issues*. 2023; 6 (3): 132. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67224208>.

20. Bagaev E.S., Chudetsky A.I., Makarov S.S. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya bystrorastushchikh form osiny dlya zakladki lesosyr'evykh plantatsii s korotkim oborotom rubki* [Evaluation of the Possibility of the Use of Fast-growing Aspen Forms for Laying Timber Plantations with a Short Turnover of Felling]. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry information*. 2023; 1: 55–67. (In Russ.). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.05. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50372387>.

21. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Chasovskikh V.P. *Sravnitel'nyi meta-analiz allometricheskikh modelei biomassy bystrorastushchikh listvennykh porod* [Comparative meta-analysis of allometric models of fast-growing hardwood biomass]. *Biosfera = Biosfera*. 2023; 15 (1): 7–20. (In Russ.). DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.789. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53211437&ysclid=mnaly8c9lk71965818>.

22. Pukinskaya M.Yu. *Tree Species Change in Nemoral Spruce Forests of the Central Forest Reserve*. *Biology Bulletin*. 2021; 48(10): 1912–1923. DOI: 10.1134/S1062359021100216.

Сведения об авторах

✉ **Иванчина Людмила Александровна** – кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией Устойчивого лесопользования Естественного института, доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>, e-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru.

Макурин Дмитрий Владиславович – инженер лаборатории Устойчивого лесопользования Естественного института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>, e-mail: 1-0-0@bk.ru.

Савостин Егор Сергеевич – лаборант лаборатории Устойчивого лесопользования Естественного института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>, e-mail: savostin.egor2014@yandex.ru.

Деменев Артем Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии техногенных процессов ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>, e-mail: demenevartem@gmail.com.

Максимович Николай Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, заслуженный эколог РФ, зав. лабораторией геологии техногенных процессов ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>, e-mail: nmax54@gmail.com.

Information about the authors

✉ **Ludmila A. Ivanchina** – Cand. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of sustained yield forest Management of Natural Science Institute, Associate Professor of Department of Biogeocoenology and environment Conservancy, Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>, e-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru.

Dmitrii V. Makurin – Engineer of the Laboratory of sustained yield forest Management of Natural Science Institute, Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1173-8946>, e-mail: 1-0-0@bk.ru.

Egor S. Savostin – Laboratory assistant of the Laboratory of sustained yield forest Management of Natural Science Institute, Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6981-184X>, e-mail: savostin.egor2014@yandex.ru.

Artem D. Demenev – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Natural Science of Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1086-178X>, e-mail: demenevartem@gmail.com.

Nikolay G. Maksimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Honored Ecologist of the Russian Federation, Head of the Research Laboratory, Institute of Natural Science of Perm State University, Bukireva str., 15, Perm, Russian Federation, 614068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6220-2730>, e-mail: nmax54@gmail.com.

✉ Для контактов / Corresponding author

Исследование способов снижения влияния силы поверхностного натяжения при флотации семян хвойных пород

Максим А. Лавренов✉, lavrenov@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>

Алексей А. Котов, kotov@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

*Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана,
ул. 1-я Институтская, д. 1, Мытищи, Московская обл., 141005, Российская Федерация*

При заготовке семян хвойных пород необходимо их разделение на пустые и полнозернистые. Одним из методов отделения пустых семян от полнозернистых является флотация семян. Флотация семян применяется для сортировки семян в жидкости по их плотности. Недостатком данного метода определения полнозернистости семян является продолжительность замачивания. Для нейтрализации силы поверхностного натяжения при флотации семян нами предложено использование перемешивающего устройства (ротатор Biosan OS-10), а также применение поверхностно-активных веществ (диэтиловый эфир). Как в России, так и за рубежом представлено крайне мало данных по флотации семян в целом и отсутствуют данные о влиянии диэтилового эфира на время проведения флотации, в частности. Объектами исследования являлись сосна обыкновенная, ель европейская, а также лиственницы сибирская, даурская и европейская. Результаты исследования показывают, что применение разнообразных методов снижения поверхностного натяжения ускоряет процесс флотации семян. Так, например, с применением ротатора прирост затонувших семян составил 61, 38, 40, 21 и 2 % соответственно для сосны, ели, лиственниц европейской, даурской и сибирской. Тем не менее универсального «идеального» подхода – с оптимальным раствором и временем замачивания, – подходящего для эффективной флотации семян всех хвойных лесобразующих пород России, пока не существует. Даже относящиеся к одному роду лиственницы сибирская, европейская и даурская совершенно по-разному проявили себя при намачивании в воде. Методика проведения флотации должна быть специфичной для каждой отдельной породы как при использовании ротатора, так и поверхностно-активных веществ. В работе представлены рекомендации по проведению флотации для каждой исследуемой породы.

Ключевые слова: *сосна, ель, лиственница, флотация семян, поверхностное натяжение, ротатор, поверхностно-активное вещество*

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: Лавренов, М. А. Исследование способов снижения влияния силы поверхностного натяжения при флотации семян хвойных пород / М. А. Лавренов, А. А. Котов // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 65–81. – *Библиогр.:* С. 79–81 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/5>.

Поступила 13.03.2026. **Пересмотрена** 30.04.2026. **Принята** 15.05. 2026. **Опубликована онлайн** 26.06.2026

Article

Study of methods to reduce the influence of surface tension force during flotation of coniferous seeds

Maxim A. Lavrenov,¹✉, lavrenov@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>

Alexey A. Kotov,¹, lavrenov@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

*Mytischki Branch (MB) of Bauman Moscow State Technical University,
1st Institutskaya street, 1, Mytischki, Moscow region, 141005, Russian Federation*

Abstract

When harvesting coniferous seeds, it is necessary to separate them into empty and full-grained seeds. One of the methods for separating empty seeds from full-grained seeds is seed flotation. Seed flotation is used to sort seeds in liquid based on their density. The disadvantage of this method of determining the fullness of seeds is the duration of soaking. To neutralize the surface tension force during seed flotation, we proposed the use of a mixing device (Biosan OS-10 rotator) and the use of surfactants (diethyl ether). There is very little data available on seed flotation in general, and no data on the effect of diethyl ether on the flotation time in particular. The objects of the study were Scots pine, European spruce, and Siberian, Daurian, and European larch. The results of the study show that the use of various methods for reducing surface tension accelerates the flotation process. However, there is currently no universal "ideal" approach with an optimal solution and soaking time that is suitable for the effective flotation of seeds from all coniferous forest-forming species in Russia. Even the Siberian, European, and Daurian larch species, which belong to the same genus, behave differently when soaked in water. The flotation method should be specific to each individual species, both when using a rotator and when using surfactants. The study provides recommendations for conducting flotation for each species under investigation.

Keywords: *pine, spruce, larch, seed flotation, surface tension, rotator, surfactant*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Lavrenov M. A., Kotov A. A. (2026). Study of methods to reduce the influence of surface tension force during flotation of coniferous seeds. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 65–81 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/5>.

Received 13.03.2026.

Revised 30.04.2026.

Accepted 15.05.2026.

Published online 26.06.2026

Введение

Исследование качества семян хвойных лесобразующих пород России необходимо для повышения эффективности воспроизводства лесов [1-7]. При этом не всем семенам свойственно прорасти [8-11]. Изучение свойств семян различных видов лиственниц, таких как лиственницы сибирская, европейская и даурская может дать интересные результаты, важные для практических интродукционных целей [12-20].

Значительной трудностью при заготовке и переработке семян хвойных пород является их очистка от примесей и сортировка на пустые и полнозернистые.

Существует несколько основных методов отделения пустых семян от полнозернистых:

- воздушная сепарация (применяется на основании разницы в весе между полными и пустыми семенами, когда поток воздуха уносит более легкие пустые семена);
- водная сепарация (в результате полнозернистые семена тонут, пустые всплывают);
- ситовая очистка (на основании того, что пустые семена часто мельче, применяются сита с разным размером ячеек);
- с использованием вибрационных столов (семена разделяются по плотности с помощью вибрации);

- оптическая сортировка (используются современные фотосепараторы, анализирующие цвет, форму, размер каждого семени);

- магнитная сепарация (семена обрабатывают магнитным порошком, который прилипает только к поврежденным/пустым семенам).

В основе различных методов лежит использование различий физико-механических свойствах семян, таких как их масса, плотность, аэродинамические и диэлектрические свойства, размер, форма, состояние поверхности и др. Каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки.

Самым распространенным является аэродинамический метод, основанный на использовании воздушного потока при разделении полнозернистых семян от пустых. Этот метод имеет недостаток, заключающийся в возможности травмирования семян и больших энергозатратах.

Для определения качества семян растений можно применить метод флотации. Флотация семян – это способ сортировки семян в жидкости по их плотности, в результате которого полнозернистые семена тонут, а пустые всплывают. Данный способ позволяет оценить полнозернистость семян перед использованием их в лесных питомниках.

Однако, несмотря на простоту использования данного метода, одним из недостатков его использования является продолжительность замачивания (при погружении, например, семян лиственницы сибирской должно пройти не менее 24 часов). Также в результате длительного замачивания на дно используемых емкостей погружается также и часть полнотелых семян вследствие набухания.

Результаты настоящей работы направлены на уменьшение времени проведения флотации семян и повышение ее эффективности. Рассмотрены физико-механические факторы, оказывающие воздействие на погружение семян в жидкость.

Целью работы являлся поиск способов нейтрализации силы поверхностного натяжения при флотации семян основных хвойных лесобразующих пород России – сосны обыкновенной, ели европейской, а также различных видов рода лиственница.

В задачи исследования входило:

- исследование погружения семян в жидкость;
- использование перемешивающего устройства для ускоренного набухания семени;
- применение поверхностно-активных веществ для снижения поверхностного натяжения водной пленки.
- подсчет затонувших семян через определенный интервал времени.

Объектами исследования являлись сосна обыкновенная, ель европейская, а также лиственница сибирская, даурская и европейская. Данные виды выбраны нами неслучайно. Лиственница сибирская и даурская являются самыми распространенными видами на территории России.

Материалы и методы

Вначале изучен процесс погружения семени. При этом рассмотрено его равновесие на поверхности жидкости (рисунок 1). На семя действуют сила тяжести G , выталкивающая (Архимедова) сила $F_{\text{выт}}$ и сила поверхностного натяжения жидкости $F_{\text{пов.}}$.

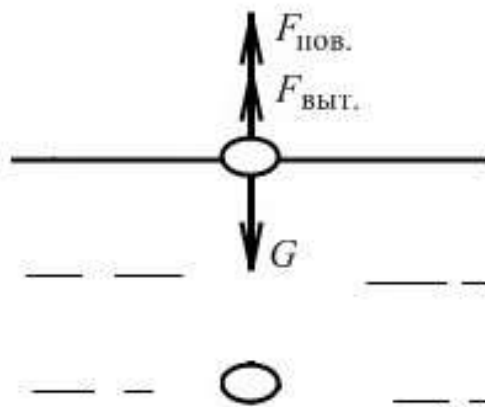


Рисунок 1. Силы, действующие на семя при погружении: $F_{\text{пов.}}$ – сила поверхностного натяжения жидкости, $F_{\text{выт.}}$ – выталкивающая сила, G – сила тяжести семени

Figure 1. Forces acting on the seed during immersion: $F_{\text{surf.}}$ – force of liquid surface tension, F_{exp} – force of expulsion, G – gravity force of the seed

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Как видно из схемы равновесия, к физико-механическим факторам, способствующим погружению семени, относятся его сила тяжести G , величина которой в процессе замачивания увеличивается из-за набухания семени. Постоянным фактором, препятствующим погружению, является выталкивающая сила $F_{\text{выт.}}$. Вектор силы поверхностного натяжения жидкости $F_{\text{пов.}}$ будет сонаправленным для семян с сухой

поверхностью с вектором $F_{\text{выт.}}$, а для семян с влажной поверхностью – с вектором G .

Выполнены экспериментальные исследования погружения семян в жидкость. Для изучения процесса флотации семян в воде и повышения ее эффективности нами было использовано перемешивающее устройство. Перемешивающие устройства различаются скоростью, амплитудой, типом вращения

платформ (орбитальный, качание) и т.д. Большое значение может иметь также вместительность платформы. Лопастные мешалки позволяют производить перемешивание в самых различных лабораторных емкостях.

В проведенных опытах применено перемешивающее устройство Biosan (Биосан) OS-10 (другие названия: ротационный перемешиватель, ротатор, лабораторный шейкер). Ротационный перемешиватель Biosan OS-10 является современной разработкой, поэтому используется в настоящее время в лабораториях. Главными отличиями данного прибора является информационный дисплей, а также современный дизайн. Непрерывное время работы шейкера составляет 96 часов. Жидкокристаллический дисплей показывает одновременно два ряда значений: установленные и текущие значения скорости и времени. В ротаторе предусмотрен цифровой контроль скорости. Устройство может

эксплуатироваться в холодных комнатах и биологических инкубаторах при температурах от +5°C до +40°C. Платформа ротатора совершает круговые колебательные движения по периметру прямоугольника. Они измеряются в об/мин.

Используемые в перемешивателе платформы:

- BioPP-4 – платформа для чашек Петри, VDLR Latex тестов и планшет 220x220 мм,
- UP-12 – универсальная платформа для различных видов колб 285x215 мм,
- P-12/100 – платформа для колб, 100-150 мл (12 мест) 250x190 мм.
- P-6/250 – платформа для колб, 250-300 мл (6 мест) 250x190 мм.

Нами была использована последняя в этом списке платформа.

Характеристика ротатора приведена в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика Biosan OS-10

Table 1

Technical Specifications of Biosan OS-10

Амплитуда колебаний The amplitude of the oscillations	10 мм 10 mm
Диапазон регулирования оборотов Speed control range	50–350 об/мин (шаг 10 об/мин) 50–350 rpm (step 10 rpm)
Таймер Timer	1 мин – 96 ч 1 min – 96 h
Максимальная нагрузка Maximum load	3,0 кг 3,0 kg
Питание Power supply	Внешний блок питания: DC 12В, 500 мА External power supply: DC 12V, 500 mA
Вес, не более Weight, no more than	4,7 кг 4,7 kg
Размеры Sizes	270x260x85 мм 270x260x85 mm

При поведении опытов по флотации семян в дистиллированной воде на ротационном перемешивателе Biosan OS-10 частота вращения была принята равной 150 об/мин. Эксперимент проведен с семенами ели европейской, сосны обыкновенной, трех видов лиственницы: сибирской, европейской и даурской. В стеклянные колбы заливалась дистиллированная вода, а затем

в каждую колбу засыпались семена определенной породы в количестве 100 шт. (рисунок 2). Потом начиналось вращение семян.

Для контроля аналогичные колбы с семенами в дистиллированной воде находились в стационарном положении.

Опыты выполнялись в трех повторностях.



Рисунок 2. Вращение семян на перемешивателе Biosan OS-10

Figure 2. Seed rotation on the Biosan OS-10 agitator

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Температура воды t находилась в пределах 20,3–22,5 °С, атмосферное давление p – в пределах 748–751 мм. рт. ст. Для определения температуры воды использовался поверенный термометр с ценой деления 0,1 °С. Атмосферное давление определялось по барометру с ценой деления 1 мм. рт. ст.

Для подсчета затонувших семян прибор периодически кратковременно выключался, сначала через 5 мин, затем через 10 мин, потом через 15 мин, далее через 30 мин и через 60 мин. Максимальная продолжительность вращения составляла 6 ч.

При проведении опытов с использованием поверхностно-активных веществ предварительно

отсчитывались партии по 100 семян каждой породы, которые затем засыпалась в отдельную емкость, заполненную дистиллированной водой с добавлением 1 мл диэтилового эфира. Емкость во время проведения опыта закрывалась плотной крышкой для предотвращения испарения эфира. Через определенные промежутки времени фиксировалось количество затонувших семян. Замачивание каждой партии семян продолжалось в течение 24 ч. Полученные данные фиксировались в журнале. Опыты проводились в трехкратной повторности.

Результаты и обсуждение

Результаты средних данных представлены на рисунке 3.

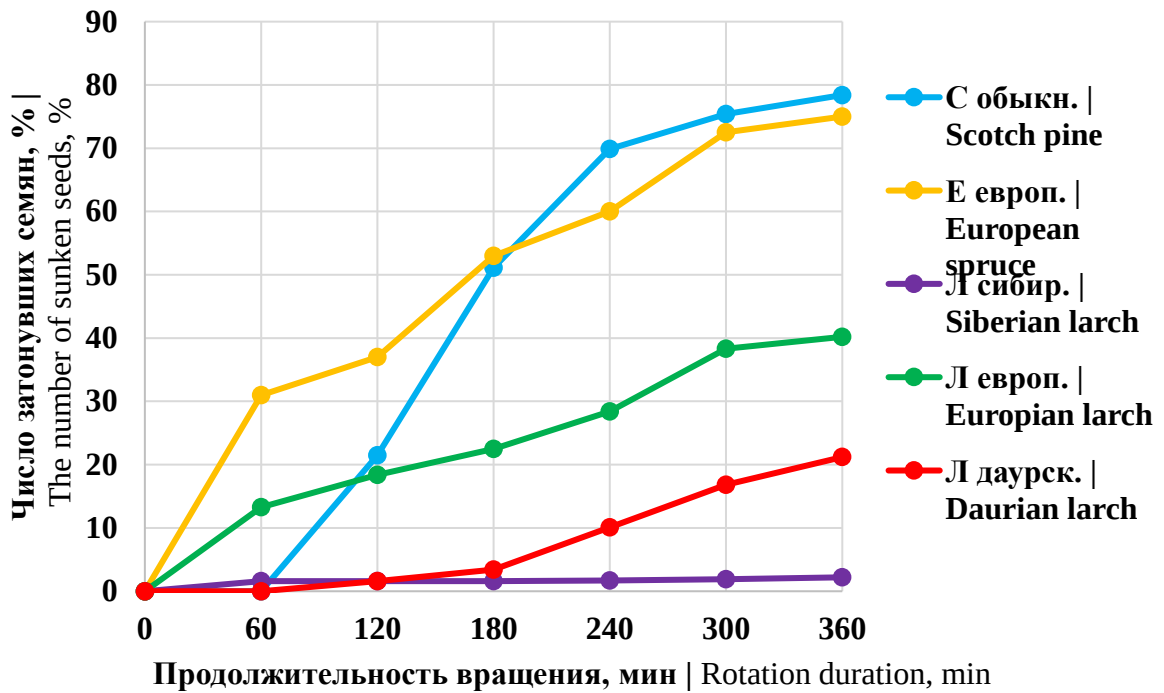


Рисунок 3. Результаты замачивания семян при вращении на ротаторе
Figure 3. Results of seed soaking during rotation on a rotator

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Из рисунка видно, что, по окончании опыта, через 6 ч после начала вращения затонуло 78 % семян сосны обыкновенной, 75 % семян ели европейской, 40 % лиственницы европейской, 21 % лиственницы даурской и лишь 2 % лиственницы сибирской. Причем семена сосны обыкновенной и

лиственницы даурской начали тонуть только после 60 мин вращения.

Результаты контрольного опыта замачивания семян без их вращения при тех же атмосферных условиях показаны на рисунке 4.

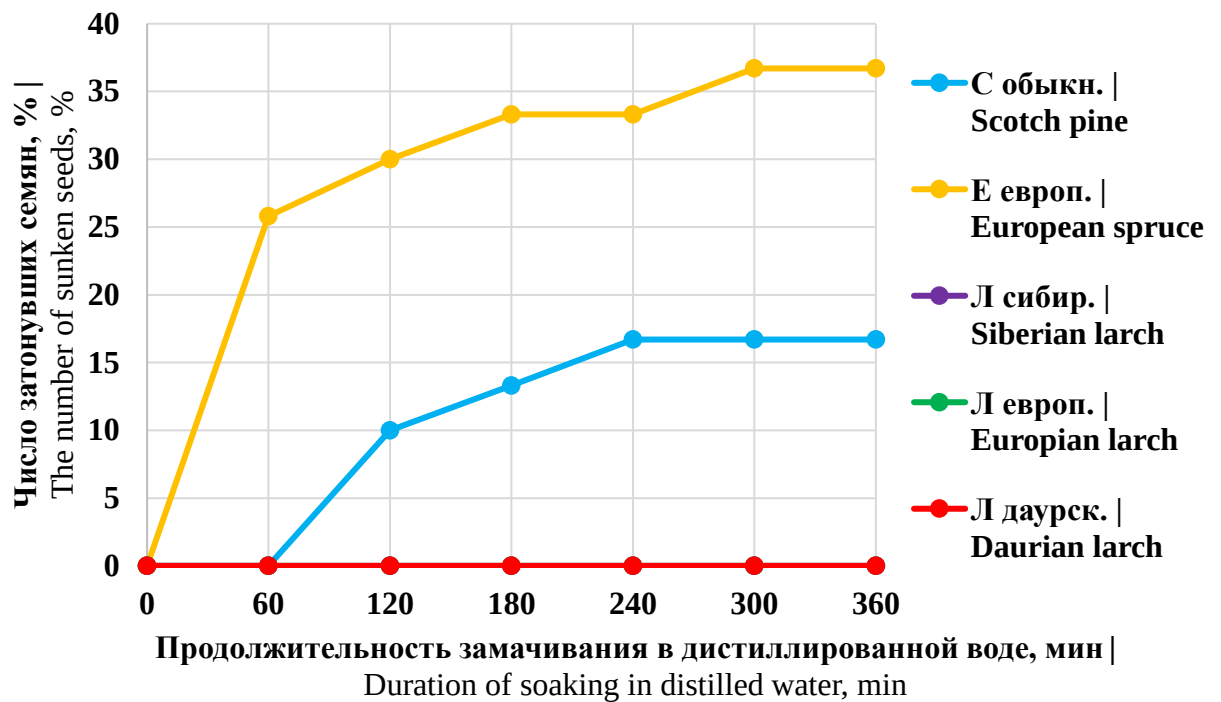


Рисунок 4. Результаты замачивания семян без вращения

Figure 4. Results of seed soaking without rotation

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Графики на рисунке показывают, что только семена ели европейской и сосны обыкновенной подвержены набуханию выше плотности воды. К концу замачивания затонули 37 % семян ели европейской и 17 % семян сосны обыкновенной. Семена же всех видов

лиственницы не начали тонуть, т.е. их плотность при замачивании не достигла плотности воды.

На рисунке 5 показаны сравнительные графики замачивания семян в дистиллированной воде в динамике (при вращении) и статике (без вращения).

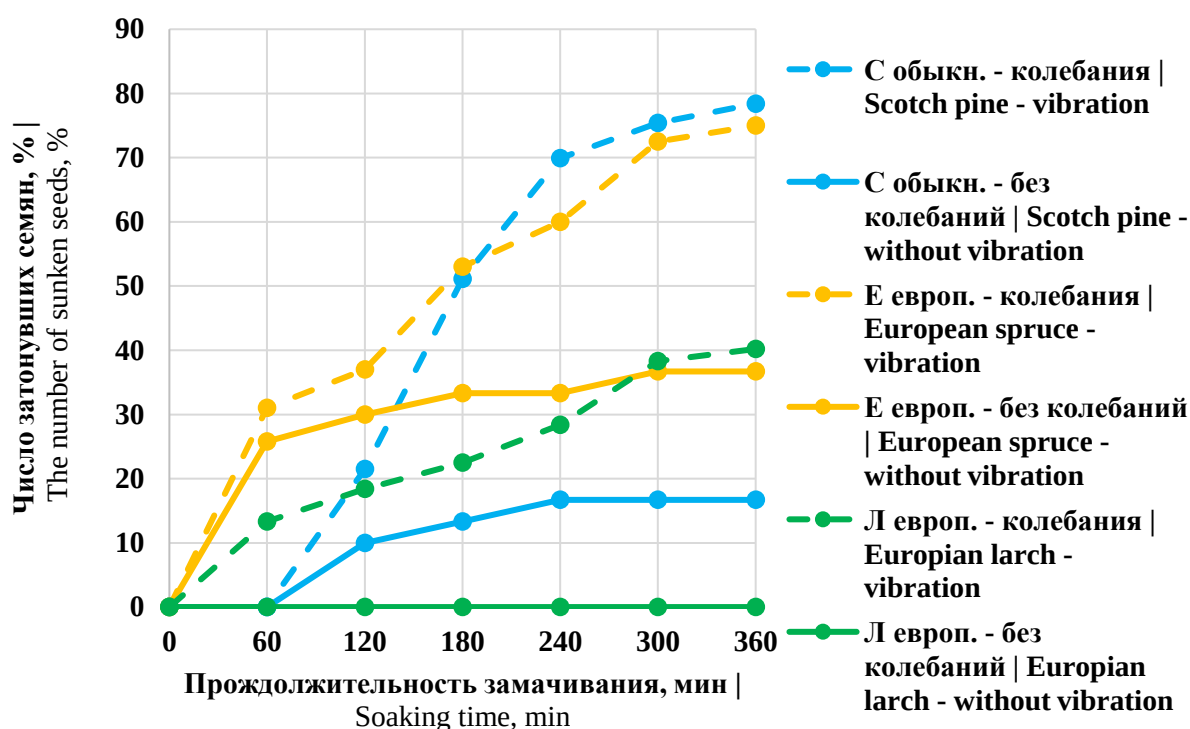


Рисунок 5. Сравнительные результаты замачивания семян

Figure 5. Comparative results of seed soaking

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Из графиков видно, что вращение (колебания семян в воде) оказывает существенное влияние на способность к погружению в жидкость, так как в этом случае быстрее преодолевается сила поверхностного натяжения жидкости. Особенно заметно это на примере сосны: затонуло дополнительно 61 % семян (78-17). При этом погружаться в воду в обоих случаях они начали одновременно после 60 мин замачивания. У ели приращение составило 38 % (75-37), у лиственницы европейской – 40 % (40-0). У остальных лиственниц изменения наблюдаются в пределах погрешности.

Для исследования влияния сил поверхностного натяжения жидкостей при флотации семян хвойных пород изучены характеристики жидкостей, имеющих разный коэффициент поверхностного натяжения.

Значение этого коэффициента зависит от рода жидкости и ее свойств, температуры (чем

больше температура, тем меньше натяжение), наличия ПАВ (поверхностно-активных веществ), присутствия каких-либо примесей, свойств газа, контактирующего с жидкостью.

Коэффициентом поверхностного натяжения σ называется отношение модуля силы поверхностного натяжения F_k длине периметра l , ограничивающего контур жидкости. В международной системе единиц он измеряется в Н/м.

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

Коэффициенты поверхностного натяжения жидкостей изменяются от 10 до 2000 Н/м.

В таблице 2 приведены значения коэффициента поверхностного натяжения некоторых жидкостей.

Таблица 2

Коэффициенты поверхностного натяжения жидкостей

Table 2

Surface tension coefficients of liquids

Вид жидкости Type of liquid	Температура, °C Temperature, °C	Коэффициент поверхностного натяжения σ , 10^{-3} Н/м Surface tension coefficient σ , 10^{-3} N/m

Естественные науки и лес

Ацетон Acetone	20	23,70
Бензол Benzene	20	52,70
Вода Water	0	75,70
Вода Water	20	72,80
Вода Water	30	71,15
Вода Water	50	67,90
Вода Water	100	58,84
Керосин Kerosene	20	24,00
Спирт изопропиловый Isopropyl alcohol	20	23,79
Спирт метиловый Methyl alcohol	20	22,61
Спирт этиловый Ethyl alcohol	20	22,78
Эфир диэтиловый Diethyl ether	20	16,97

На основании этой таблицы принят для проведения опытов диэтиловый эфир, имеющий самый низкий коэффициент поверхностного натяжения, равный 16,97 Н/м.

Диэтиловый эфир, или просто эфир, представляет собой органическое соединение. Это бесцветная, прозрачная, высоколетучая, со сладковатым резким запахом («эфирный запах») и жгучим вкусом, чрезвычайно легковоспламеняющаяся жидкость. Вещество разлагается под действием тепла, воздуха и света, образуя токсичные альдегиды, кетоны и пероксиды.

Эфир диэтиловый (эфир этиловый) относится к 3 классу опасности согласно классификации ООН (UN) «Легковоспламеняющиеся жидкости». Классификационный код – F1. Номер опасности – 33.

Его химическая формула: $(\text{CH}_3\text{CH})_2\text{O}$ или $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$.

Эфиры – это общее название двух классов кислородсодержащих органических соединений.

Они являются продуктами замещения атомов водорода гидроксильных групп спиртов и фенолов (простые эфиры) или кислот (карбоновых и минеральных; сложные эфиры) на углеводородные радикалы.

По номенклатуре ИЮПАК простые эфиры называют этерами, а сложные – эстерами.

Часто под словом «эфир» подразумевают диэтиловый эфир.

Эфиры применяются в химическом синтезе, бытовой химии, медицине, парфюмерной промышленности и др.

В таблице 3 приведена характеристика диэтилового спирта.

Таблица 3

Характеристика диэтилового эфира

Table 3

Characteristics of Diethyl Ether

Параметр Parameter	Значение или характеристика Meaning or characteristic
Состояние Condition	Жидкость liquid
Температура плавления Melting point	-116 °C
Температура кипения Boiling point	34,6 °C
Плотность Density эфира для наркоза ether for anesthesia эфира медицинского medical ether	0,713–0,714 г/мл 0,713–0,714 g/ml 0,714–0,717 г/мл 0,714–0,717 g/ml
Молекулярная масса Molecular weight	74,12 а.е.м. 74,12 u
Динамическая вязкость при 20 °C Dynamic viscosity at 20 °C	0,242 мПа·с 0,242 mPa·s
Растворимость Solubility в ацетоне in acetone в бензоле in benzene в воде при 20°C in water at 20°C в лигроине in ligroin	хорошо растворим well soluble хорошо растворим well soluble 6,5 г/100 г 6,5 g/100 g хорошо растворим well soluble

в хлороформе in chloroform в этаноле in ethanol	хорошо растворим well soluble хорошо растворим well soluble
Природные и антропогенные источники Natural and anthropogenic sources	выделяется в небольшой концентрации гречихой при цветении it is released in a small concentration by buckwheat during flowering

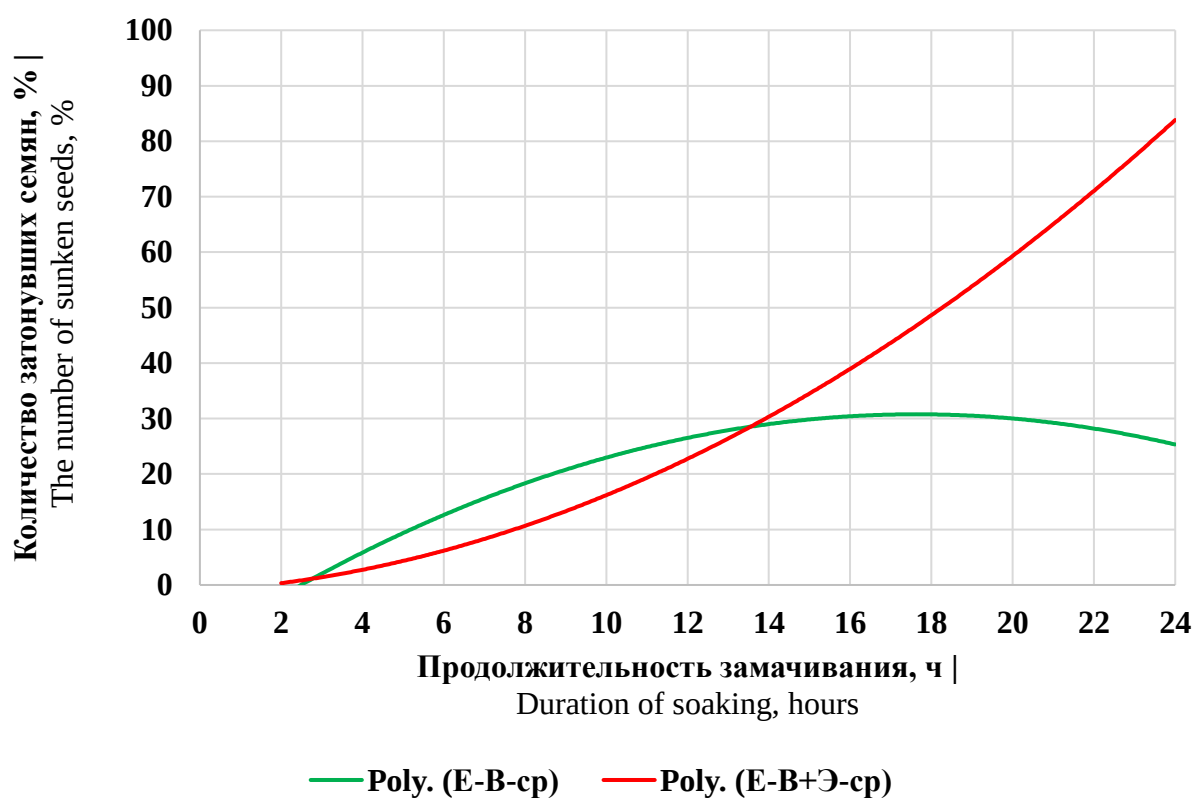
При выполнении экспериментов заливали дистиллированную воду в две литровые емкости (одна из них опыт, другая контроль). В них засыпали по 100 шт. семян сосны обыкновенной, ели европейской или лиственницы сибирской, проводя их замачивание. Семена имели нормальную влажность. При проведении каждого опыта фиксировали температуру жидкости и воздуха и атмосферное давление. Затем через некоторое время в течение 10 с стеклянной палочкой вручную периодически перемешивали семена. В опытную емкость добавили 0,5 мл диэтилового эфира. Для исключения его испарения емкость герметично закрывали крышкой, которую открывали только при перемешивании. Периодически подсчитывали число затонувших семян и строили график

зависимости количества затонувших семян от продолжительности замачивания, которая изменялась в разных опытах от 188 до 1378 мин.

Температура воды изменялась в процессе проведения опытов от 20,0 до 24,5 °С, температура воздуха – от 19, 2 до 24,5 °С, атмосферное давление – от 738 до 744 мм рт. ст.

На рисунке 6–8 представлены аппроксимированные графики зависимостей количества затонувших семян ели, сосны и лиственницы от продолжительности замачивания в чистой дистиллированной воде и в дистиллированной воде с добавлением диэтилового эфира.

Уравнения полученных кривых приведены в таблицах 4–6.



polynomial (Spruce. Water. Average)

polynomial (Spruce. Water. +
diethyl ether. Average)

Рисунок 6. Зависимость количества затонувших семян ели от продолжительности замачивания в чистой дистиллированной воде и дистиллированной воде с добавлением диэтилового эфира

Естественные науки и лес

Figure 6. Dependence of the number of submerged spruce seeds on the duration of soaking in pure distilled water and distilled water with the addition of diethyl ether

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Из рисунка 6 следует, что за 24 ч в чистой дистиллированной воде тонет 25 % семян ели, в то время как в дистиллированной воде с добавлением диэтилового эфира – 83 %. Таким образом, здесь

наблюдается более трехкратное превышение числа затонувших семян. Первая кривая имеет точку максимума при 17,5 ч, равную 31 %.

Таблица 4

Уравнения кривых изменения количества затонувших семян ели

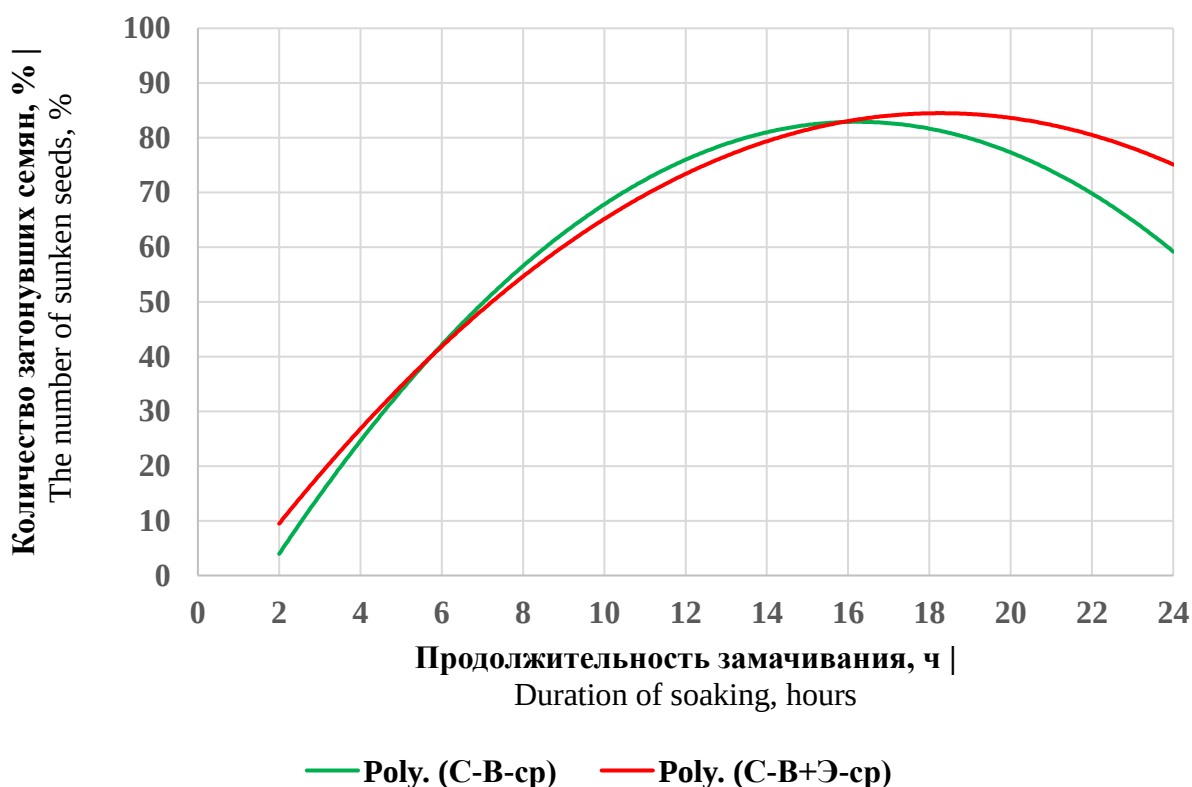
Table 4

Equations of the curves of changes in the number of sunken spruce seeds

Вид жидкости Type of liquid	Уравнение The equation	Достоверность аппроксимации R^2 R^2 approximation accuracy
дистиллированная вода distilled water	$y = -0,1342x^2 + 4,7329x - 10,9490$	0,9582
дистиллированная вода с добавлением диэтилового эфира distilled water with the addition of diethyl ether	$y = 0,1295x^2 + 0,4273x - 1,0425$	0,9836

Таким образом, согласно R^2 уравнения зависимости количества затонувших семян от времени замачивания достаточно точны в обоих

случаях, что делает проведение флотации для ели европейской эффективным.



polynomial (Pine. Water. Average)

polynomial (Pine. Water. +
diethyl ether. Average)

Рисунок 7. Зависимость количества затонувших семян сосны от продолжительности замачивания в чистой дистиллированной воде и дистиллированной воде с добавлением диэтилового эфира

Figure 7. Dependence of the number of sunken pine seeds on the duration of soaking in pure distilled water and distilled water with the addition of diethyl ether

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Графики на рисунке 7 показывают, что за 24 ч в чистой дистиллированной воде тонет 59 % семян сосны, в то время как в дистиллированной воде с добавлением диэтилового эфира – 75 %.

Таким образом, здесь наблюдается превышение всего в 1,27 раза. Обе кривые имеют точки максимума соответственно при 16 ч, равную 83 %, и 18 ч, равную 85 %.

Таблица 5

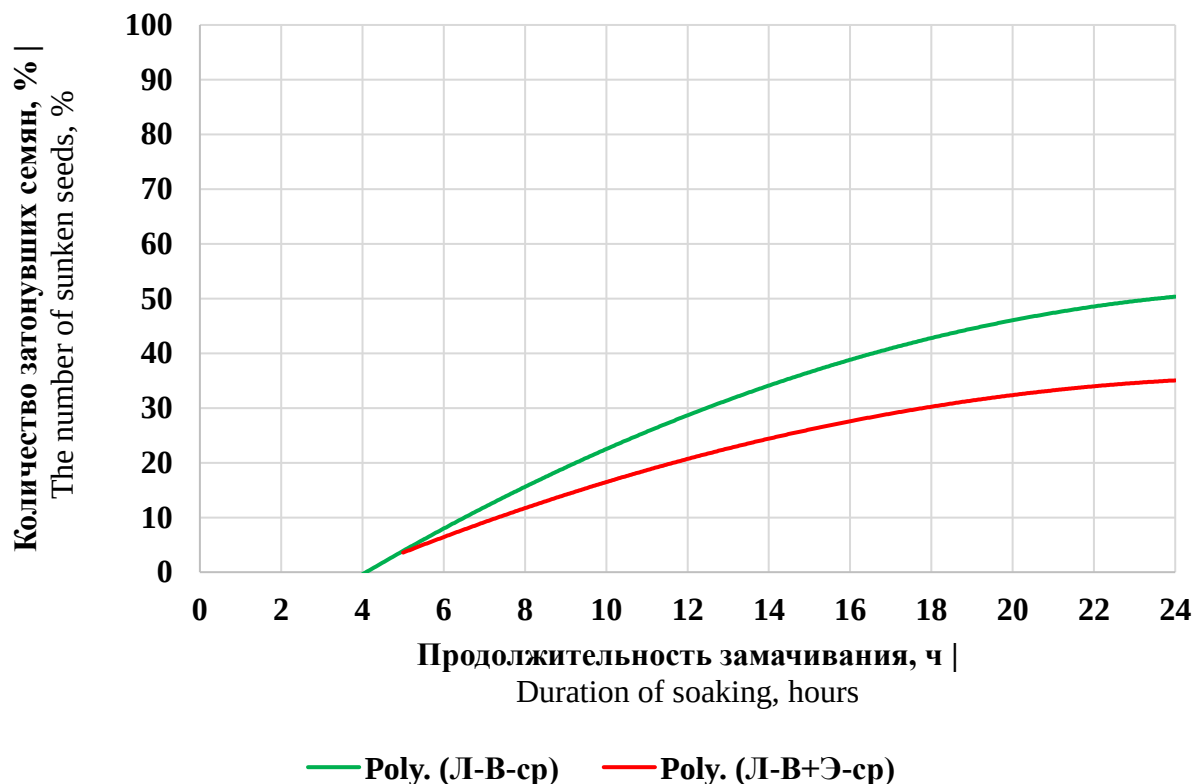
Уравнения кривых изменения количества затонувших семян сосны

Table 5

Equations of the curves of the change in the number of sunken pine seeds

Вид жидкости Type of liquid	Уравнение The equation	Достоверность аппроксимации R^2 R^2 approximation accuracy
дистиллированная вода distilled water	$y = -0,3909x^2 + 12,6740x - 19,8330$	0,9695
дистиллированная вода с добавлением диэтилового эфира distilled water with the addition of diethyl ether	$y = -0,2839x^2 + 10,3660x - 10,1210$	0,9180

Коэффициенты детерминации здесь также показывают достаточно высокую точность.



polynomial (Larch. Water. Average)

polynomial (Larch. Water. + diethyl ether.
Average)

Рисунок 8. Зависимость количества затонувших семян лиственницы от продолжительности замачивания в чистой дистиллированной воде и дистиллированной воде с добавлением диэтилового эфира

Естественные науки и лес

Figure 8. Dependence of the number of sunken larch seeds on the duration of soaking in pure distilled water and distilled water with the addition of diethyl ether

Источник: собственная композиция
авторов

Source: author's composition

Из графиков на рисунке 8 видно, что за 24 ч в чистой дистиллированной воде тонет 50 % семян лиственницы, в то время как в

дистиллированной воде с добавлением диэтилового эфира – 35 %. Таким образом, здесь наблюдается обратное превышение в 1,42 раза, в отличие от первых двух пород. Точек экстремума здесь не наблюдается.

Таблица 6

Уравнения кривых изменения количества затонувших семян лиственницы

Table 6

Equations of the curves of changes in the number of sunken larch seeds

Вид жидкости Type of liquid	Уравнение The equation	Достоверность аппроксимации R^2 R^2 approximation accuracy
дистиллированная вода distilled water	$y = -0,0912x^2 + 5,0903x - 19,286$	0,9447
дистиллированная вода с добавлением диэтилового эфира distilled water with the addition of diethyl ether	$y = -0,0657x^2 + 3,5620x - 12,5880$	0,9200

Коэффициенты детерминации показывают, что модели достаточно точные.

Выполнен статистический анализ полученных результатов при продолжительности замачивания 24 ч. Представлены стандартные

отклонения, доверительные интервалы и коэффициенты вариации (табл. 7). Определена статистическая значимость различий с помощью t-критерия Стьюдента. Уровень значимости принят равным 0,05 (табл. 8).

Таблица 7

Статистические характеристики количества затонувших семян

Table 7

Statistical characteristics of the number of sunken seeds

Порода species	Жидкость Liquid	Среднее Average	Стандартное отклонение Standard deviation	Доверительный интервал Confidence interval	Коэффициент вариации Coefficient of variation
Ель Spruce	Вода Water	25	2,18	25±5	8,7
	Вода +эфир Water + diethyl ether	84	6,56	84±16	7,8
Сосна Pine	Вода Water	59	3,61	59±9	6,1
	Вода +эфир Water + diethyl ether	75	5,29	75±13	7,1
Лиственница Larch	Вода Water	50	4,36	50±11	8,7
	Вода +эфир Water + diethyl ether	35	2,65	35±7	7,6

Порода species	Жидкость Liquid	Расчетный критерий Стьюдента $t_{расч}$ Calculated Student's t-test criterion	Табличный критерий Стьюдента $t_{табл}$ Student's t- test table criterion
Ель Spruce	Вода Water	14,79	2,78
	Вода +эфир Water + diethyl ether		
Сосна Pine	Вода Water	4,33	2,78
	Вода +эфир Water + diethyl ether		
Лиственница Larch	Вода Water	5,10	2,78
	Вода +эфир Water + diethyl ether		

Данные табл. 8 показывают, что во всех трех случаях $t_{расч} > t_{табл}$. Это значит, что полученные зависимости имеют статистически значимые различия, т.е. результаты замачивания семян в воде отличаются от результатов замачивания их в воде с добавлением эфира.

Заключение

Результаты исследований показали, что при проведении флотации семян лиственниц необходимо применять способы снижения влияния силы поверхностного натяжения. Это заключение верно для всех рассматриваемых видов лиственниц – европейской, сибирской и даурской так как за время проведения опыта (6 часов) не затонуло ни одно семя.

Вращение семян в воде оказывает существенное влияние на их способность к погружению в жидкость тем самым позволяя эффективнее проводить флотацию. При использовании ротатора дополнительно затонуло 61 % семян сосны, 38 % семян ели, 40 % семян лиственницы европейской, 21 % семян лиственницы даурской, 2 % семян лиственницы сибирской.

Методика проведения флотации при использовании ротатора должна быть различной так как семена лиственницы сибирской, европейской и даурской совершенно по-разному проявили себя при намачивании в воде. Так семена лиственницы европейской с первого часа опыта показали разделение семян на плавающие и затонувшие, семена лиственницы даурской только по истечении 4 часов «активно» начали тонуть, семена же лиственницы сибирской практически все остались на поверхности воды на протяжении

всего времени вращения, что говорит об их более низкой плотности и меньшей способности к набуханию.

Методика проведения флотации при использовании диэтилового эфира также должна различаться в зависимости от плотности используемых семян. Так, по истечении 24 часов в воде с добавлением диэтилового эфира затонуло на 58 % больше семян ели и 16 % семян сосны. Для семян лиственницы применение диэтилового эфира оказалось неэффективным.

Таким образом результаты исследования указывают, что использование различных способов снижения влияния силы поверхностного натяжения позволяет ускорить проведение флотации семян. Однако не существует «идеального» метода, включающего в себя подходящий раствор и время замачивания, позволяющего эффективно проводить флотацию одновременно для всех семян хвойных лесобразующих пород России.

По результатам исследования нами представлены следующие рекомендации:

1. флотацию семян ели европейской и сосны обыкновенной можно проводить в дистиллированной воде на ротационном перемешивателе при продолжительности вращения от 3 до 5 ч.

2. флотацию семян ели европейской и сосны обыкновенной также можно выполнять в дистиллированной воде с добавлением 0,5 мл диэтилового эфира при замачивании на протяжении 4–6 ч.

3. для флотации семян лиственниц необходимы более легкие жидкости, например, водные растворы спиртов.

Список литературы

1. Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 4(394). – С. 93-104. – DOI 10.37482/0536-1036-2023-4-93-104.
2. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Орнатский А.Н., Коваленко И.П. Создание лесных культур сосны обыкновенной посевом семян в Нижегородской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 239. – С. 55-75. – DOI 10.21266/2079-4304.2022.239.55-75.
3. Тюкавина О.Н., Демина Н.А. Практика повышения посевных качеств семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26, № 6. – С. 75-91. – DOI 10.18698/2542-1468-2022-6-75-91.
4. Шабунин Д.А., Бутенко О.Ю. Высев семян сосны и ели совместно с удобрениями и агроメリорантами // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2023. – № 4. – С. 75-85. – DOI 10.21178/2079-6080.2023.4.75.
5. Кузнецова Г.В. Межпопуляционная изменчивость размера шишек и массы семян сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) // Хвойные бореальной зоны. – 2022. – Т. 40, № 5. – С. 369-373. – DOI 10.53374/1993-0135-2022-5-369-373.
6. Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Аксенов П.А. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на лабораторную всхожесть семян и выход сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 4. – С. 21-26. – DOI 10.18698/2542-1468-2021-4-21-26.
7. Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю. Влияние предпосевной обработки семян (дражирования) на грунтовую всхожесть и дальнейший рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 35-40. – DOI 10.18698/2542-1468-2022-1-35-40.
8. Шеленга Т.В., Саликова А.В., Попов В.С., Егорова Г.П., Малышев Л.Л., Вишнякова М.А. Взаимосвязи основных признаков качества семян люпина узколистного из коллекции ВИР // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 35-43. – DOI 10.18699/vjgb-25-05.
9. Karimizadeh R., Pezeshkpour P., Mirzaee A., Barzali M., Sharifi P., Safari-Motlagh M.R. Stability analysis for seed yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes by experimental and biological approaches // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. – 2023. – Vol. 27, №. 2. – P. 135-145. – DOI 10.18699/VJGB-23-19.
10. Комарова Т.А., Терехина Н.В., Орехова Т.П. Покой жизнеспособных семян в почве и их прорастание после пожаров в широколиственно-кедровых лесах Южного Сихотэ-Алиня // Ботанический журнал. – 2021. – Т. 106, № 3. – С. 255-271. – DOI 10.31857/S0006813621030030.
11. Бутузова О.Г., Ковалева А.А., Андропова Е.В. Влияние холода на прорастание семян *Cardiocrinum cordatum* var. *glehnii* (Liliaceae) // Ботанический журнал. – 2023. – Т. 108, № 12. – С. 1119-1127. – DOI: 10.31857/S0006813623120037.
12. Маззев С.А., Острошенко Л.Ю. Влияние стимуляторов роста на посевные качества семян лиственницы Комарова (*Larix x Komarovii* B. Kolesn.) // Аграрный вестник Приморья. – 2021. – № 2(22). – С. 72-76. Режим доступа: <https://elibrary.ru/awhior?ysclid=mn1ml6lsxq483925215>.
13. Пастухова А.М., Третьякова Н.С., Войткевич А.Е. Рост всходов лиственницы сибирской в зависимости от способа предпосевной обработке семян и состава субстрата // Хвойные бореальной зоны. – 2022. – Т. 40, № 6. – С. 509-512. – DOI 10.53374/1993-0135-2022-6-509-512.
14. Крук Н.К., Якимов Н.И., Тупик П.В., Юреня А.В. Морфометрические показатели шишек и качество семян на лесосеменных плантациях лиственницы европейской // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2021. – № 1 (240). – С. 52-57. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44694925&ysclid=mn1n3erpl8798545571>.
15. Oreshkova N.V., Pimenov A.V., Sedel'nikova T.S., Efremov S.P. Genetic Polymorphism of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) in Contrasting Ecotopes of the Republic of Khakassia // Russian Journal of Genetics. 2025; 61 (1): 37-44. – DOI 10.1134/S1022795424701370.
16. Zhu Ye., Liang Y., Peng Ch. New species and records of Phaeobotryon (Botryosphaerales, Botryosphaeriaceae) from Larix in China // MycoKeys. 2025; 112: 1-15. – DOI 10.3897/mycokeys.112.139053.
17. Park J., Lee S., Yim J., Chung S., Song J., Park Y., Kim W., Kang H., Son Ye. Derivation of Site Index and Mean Annual Volume Increment in Larix kaempferi Forests Using National Forest Inventory // Journal of Agriculture & Life Science. 2025; 59 (1): 57-64. – DOI 10.14397/jals.2025.59.1.57.
18. Tong Y., Chen D., Sun X., Gao H. A comprehensive crown profile model of planted Larix kaempferi from different latitudes in China // European Journal of Forest Research. 2024; 143: 1429-1446. – DOI 10.1007/s10342-024-01703-y.

19. Qiao J., Sun Yu. Effects of altitude and slope on the climate–radial growth relationships of *Larix olgensis* A. Henry in the southern Lesser Khingan Mountains, Northeast China // *Ecological Processes*. 2022; 11 (1): 1-13. – DOI 10.1186/s13717-022-00388-8.

20. Zhang J., Zhao J., Cheng R., Ge Zh., Zhang Zh. Effects of neighborhood competition and stand structure on the productivity of pure and mixed *Larix principis-rupprechtii* forests // *Forests*. 2022; 13 (8): 1318. – DOI 10.3390/f13081318

References

1. Ostroshenko V.Yu., Ostroshenko L.Yu. *Vliyanie stimulyatorov na vskhozhest' semyan i rost seyantsev sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.)* [Effect of stimulants on seed germination and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. 2023; 4 (394): 93-104. – DOI 10.37482/0536-1036-2023-4-93-104.

2. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Ornatskiy A.N., Kovalenko I.P. *Sozдание lesnykh kul'tur sosny obyknovennoy posevom semyan v Nizhegorodskoy oblasti* [Creation of Scots pine forest cultures by sowing seeds in the Nizhny Novgorod region] *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*. 2022; 239: 55-75. DOI 10.21266/2079-4304.2022.239.55-75. – DOI 10.21266/2079-4304.2022.239.55-75.

3. Tyukavina O.N., Demina N.A. *Praktika povysheniya posevnykh kachestv semyan sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) i eli evropeyskoy (Picea abies L.)* [Practice of improving the sowing qualities of common pine (*Pinus sylvestris* L.) and European spruce (*Picea abies* L.) seeds] *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*. 2022; 26 (6): 75-91. – DOI 10.18698/2542-1468-2022-6-75-91.

4. Shabunin D.A., Butenko O.Yu. *Vysev semyan sosny i eli sovmestno s udobreniyami i agromeliorantami* [Sowing pine and spruce seeds together with fertilizers and agro-ameliorants] *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva*. 2023; 4: 75-85. – DOI 10.21178/2079-6080.2023.4.75.

5. Kuznetsova G.V. *Mezhpopulyatsionnaya izmenchivost' razmera shishek i massy semyan sosny sibirskoy kedrovoy (Pinus sibirica Du Tour)* [Interpopulation variability of pine cone size and seed mass in Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour)] *Khvoynye boreal'noy zony*. 2022; 40 (5): 369-373. – DOI 10.53374/1993-0135-2022-5-369-373.

6. Smirnov A.I., Orlov F.S., Aksenov P.A. *Vliyanie nizkochastotnogo elektromagnitnogo polya na laboratornyuyu vskhozhest' semyan i vykhod seyantsev sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.)* [Effect of a low-frequency electromagnetic field on the laboratory germination of seeds and the yield of common pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings] *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*. 2021; 25 (4): 21-26. – DOI 10.18698/2542-1468-2021-4-21-26.

7. Ostroshenko V.Yu., Ostroshenko L.Yu. *Vliyanie predposevnoy obrabotki semyan (drazhirovaniya) na gruntovuyu vskhozhest' i dal'neyshiy rost seyantsev sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.)* [The effect of pre-sowing seed treatment (pelleting) on the soil germination and further growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings] *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*. 2022; 26 (1): 35-40. – DOI 10.18698/2542-1468-2022-1-35-40.

8. Shelenga T.V., Salikova A.V., Popov V.S., Yegorova G.P., Malyshev L.L., Vishnyakova M.A. *Vzaimosvyazi osnovnykh priznakov kachestva semyan lyupina uzkolistnogo iz kolleksii VIR* [Relationships between the main characteristics of *Lupinus angustifolius* seeds from the VIR collection] *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii*. 2025; 29 (1): 35-43. – DOI 10.18699/vjgb-25-05.

9. Karimizadeh R., Pezeshkpour P., Mirzaee A., Barzali M., Sharifi P., Safari-Motlagh M.R. Stability analysis for seed yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes by experimental and biological approaches. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2023; 27 (2): 135-145. – DOI 10.18699/VJGB-23-19.

10. Komarova T.A., Terekhina N.V., Orekhova T.P. *Pokoy zhiznesposobnykh semyan v pochve i ikh prorastaniye posle pozharov v shirokolistvenno-kedrovyykh lesakh Yuzhnogo Sikhote-Alinya* [Resting of viable seeds in the soil and their germination after fires in the broad-leaved cedar forests of the Southern Sikhote-Alin] *Botanicheskiy zhurnal*. 2021; 106 (3): 255-271. – DOI 10.31857/S0006813621030030.

11. Butuzova O.G., Kovaleva A.A., Andronova E.V. *Vliyaniye kholoda na prorastaniye semyan Cardiacrinum cordatum var. glehnii (Liliaceae)* [Effect of cold on seed germination of *Cardiacrinum cordatum* var. *glehnii* (Liliaceae)] *Botanicheskiy zhurnal*. 2023; 108 (12): 1119-1127. – DOI: 10.31857/S0006813623120037.

12. Mazaev S.A., Ostroshenko L.Yu. *Vliyanie stimulyatorov rosta na posevnye kachestva semyan listvennitsy Komarova (Larix x Komarovii B. Kolesn.)* [Effect of growth stimulants on the sowing qualities of Komarov's larch seeds (*Larix x Komarovii* B. Kolesn.)] *Agrarnyy vestnik Primor'ya*. 2021; 2(22): 72-76. (In Russ.).

13. Pastukhova A.M., Tret'yakova N.S., Voytkovich A.E. *Rost vskhodov listvennitsy sibirskoy v zavisimosti ot sposoba predposevnoy obrabotke semyan i sostava substrata* [Growth of Siberian larch seedlings depending on the method of pre-sowing seed treatment and the composition of the substrate] *Khvoynye boreal'noy zony*. 2022; 40 (6): 509-512. DOI 10.53374/1993-0135-2022-6-509-512. (In Russ.).

14. Kruk N.K., Yakimov N.I., Tupik P.V., Yurenova A.V. *Morfometricheskie pokazateli shishek i kachestvo semyan na lesesemennykh plantatsiyakh listvennitsy evropeyskoy* [Morphometric indicators of cones and seed quality in European larch seed plantations] *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka*

vozobnovlyaemykh resursov. 2021; 1 (240): 52-57. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44694925&ysclid=mn1n3erpl8798545571>.

15. Oreshkova N.V., Pimenov A.V., Sedel'nikova T.S., Efremov S.P. Genetic Polymorphism of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) in Contrasting Ecotopes of the Republic of Khakassia. Russian Journal of Genetics. 2025; 61 (1): 37-44. – DOI 10.1134/S1022795424701370.

16. Zhu Ye., Liang Y., Peng Ch. New species and records of Phaeobotryon (Botryosphaerales, Botryosphaeriaceae) from Larix in China. MycoKeys. 2025; 112: 1-15. – DOI 10.3897/mycokeys.112.139053.

17. Park J., Lee S., Yim J., Chung S., Song J., Park Y., Kim W., Kang H., Son Ye. Derivation of Site Index and Mean Annual Volume Increment in Larix kaempferi Forests Using National Forest Inventory. Journal of Agriculture & Life Science. 2025; 59 (1): 57-64. – DOI 10.14397/jals.2025.59.1.57.

18. Tong Y., Chen D., Sun X., Gao H. A comprehensive crown profile model of planted Larix kaempferi from different latitudes in China. European Journal of Forest Research. 2024; 143: 1429-1446. – DOI 10.1007/s10342-024-01703-y.

19. Qiao J., Sun Yu. Effects of altitude and slope on the climate–radial growth relationships of Larix olgensis A. Henry in the southern Lesser Khingan Mountains, Northeast China. Ecological Processes. 2022; 11 (1): 1-13. – DOI 10.1186/s13717-022-00388-8.

20. Zhang J., Zhao J., Cheng R., Ge Zh., Zhang Zh. Effects of neighborhood competition and stand structure on the productivity of pure and mixed Larix principis-rupprechtii forests. Forests. 2022; 13 (8): 1318. – DOI 10.3390/f13081318

Сведения об авторах

✉ *Лавренов Максим Александрович* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ЛТ1-МФ. Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Служ. адрес: ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., 141005, Российская Федерация. Тел.: 8-977-809-32-00. E-mail: lavrenov@bmstu.ru.

Котов Алексей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры ЛТ1-МФ. Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Служ. адрес: ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., 141005, Российская Федерация. E-mail: kotov@bmstu.ru.

Information about authors

✉ *Maxim A. Lavrenov* – Cand. Sc. (Agriculture), associate professor of the department LT-1, BMSTU (Mytishchi branch), 1st Institutskaya street, 1, Mytishchi, Moscow region, 141005, Russian Federation, e-mail: lavrenov@bmstu.ru.

Alexey A. Kotov – Dr. Sci. (Technical), Prof. of the department LT-1 BMSTU (Mytishchi branch), 1st Institutskaya street, 1, Mytishchi, Moscow region, 141005, Russian Federation, e-mail: kotov@bmstu.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author



**Комплексная оценка влияния гидrolесомелиорации
и лесоводственных мероприятий на продуктивность
сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) в условиях Вологодской области**

Олег С. Попов¹ ✉, popovoleg81@gmail.com, 0000-0003-2464-1729
Анатолий С. Новосёлов², AnSer-Rock-Bard@mail.ru, 0000-0002-6907-0424
Фёдор Н. Дружинин¹, drujinin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4645-4270>

¹ ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина»,
ул. Шмидта, 2, с. Молочное, гор. округ г. Вологда, 160555, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», ул. Ленина, 15, г. Вологда, 160000, Российская
Федерация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексной оценки долговременного влияния гидrolесомелиорации и лесоводственных уходов на продуктивность и качество древесины сосняков в условиях масштабных климатических изменений. Цель работы – анализ динамики лесоводственно-таксационных показателей, смолопродуктивности и макроструктуры древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на объектах многолетнего мониторинга в Сокольском муниципальном округе Вологодской области. Исследования проведены на девяти пробных площадях, отграниченных в разных условиях местопроизрастания: естественные болотные древостои (контроль), осушение (1970-е гг.), осушение в сочетании с лесоводственными мероприятиями (проходная рубка ухода и добровольно-выборочная заготовка древесины; 1990-е гг.). Применены стандартные таксационные методы, оценка смолопродуктивности (ОСТ 13-80-79), дендрохронологический анализ и расчет базисной плотности древесины. Установлено, что гидrolесомелиорация положительно сказалась на запасе древесины (увеличение на 30 – 35 % по сравнению с заболоченным контролем). Проведенный лесоводственный уход оптимизировал структуру древостоя, повысив долю деревьев высших классов Крафта. Выявлено, что максимальная смолопродуктивность характерна для осушаемых насаждений, пройденных проходной рубкой ухода (239 г), а также для естественных низинных болот. При этом ширококронные деревья продуцируют живицы при подсочке достоверно больше, чем узкокронные. Найдена связь выхода терпентина с экспозицией кроны, обусловленная ориентацией осушительных каналов. Дендрохронологический анализ показал, что осушение стимулирует прирост древесины: ширина годичного кольца увеличилась на 9 % за счет утолщения зоны поздней древесины (на 27 %) при сокращении ранней (на 15 %). Плотность древесины сосны в приканальных областях мелиорируемых лесополос возросла на 5 %, превысив среднерегиональные показатели.

Ключевые слова: гидротехническая мелиорация, торфяные почвы, сосна обыкновенная, лесохозяйственные мероприятия, сосновый терпентин (живица), плотность древесины

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: Попов, О. С. Комплексная оценка влияния гидrolесомелиорации и лесоводственных мероприятий на продуктивность сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) в условиях Вологодской области / О. С. Попов, А. С. Новосёлов, Ф. Н. Дружинин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 82–99. – Библиогр.: с. 97–99 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/6>.

Поступила 03.03. 2026. Пересмотрена 14.04.2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

Comprehensive Assessment of the Influence of Hydroforestry Reclamation and Silvicultural Measures on the Productivity of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) under the Conditions of the Vologda Region

Oleg S. Popov¹ ✉, popovoleg81@gmail.com,  0000-0003-2464-1729
Anatoly S. Novoselov², AnSer-Rock-Bard@mail.ru,  0000-0002-6907-0424
Fedor N. Druzhinin¹, drujinin@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4645-4270>

¹FSBEI HE Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, 2 Schmidt St., Molochnoye, Vologda Urban Okrug, 160555, Russian Federation

²FSBEI HE Vologda State University, 160000, 15 Lenina Street, Vologda, Russian Federation

Abstract

The relevance of the study is determined by the need for a comprehensive assessment of the long-term impact of hydroforestry reclamation and silvicultural treatments on the productivity and wood quality of pine forests in the context of large-scale climatic changes. Aim of the Work. The aim of the work is to analyze the dynamics of forest inventory parameters, resin productivity, and macrostructure of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood at long-term monitoring sites in the Sokolsky Municipal District of the Vologda Region. Methods. The research was conducted on nine sample plots established in different site conditions: natural swamp forest stands (control), drainage (1970s), and drainage combined with silvicultural measures (intermediate thinning and selective logging; 1990s). Standard forest inventory methods, resin productivity assessment (according to OST 13-80-79), dendrochronological analysis, and calculation of basic wood density were applied. It was found that hydroforestry reclamation had a positive effect on timber stock (an increase of 30–35% compared to the waterlogged control). The implemented silvicultural treatments optimized the stand structure, increasing the proportion of trees in the higher Kraft classes. It was revealed that maximum resin productivity is characteristic of drained stands that underwent intermediate thinning (239 g), as well as natural lowland bogs. Furthermore, wide-crowned trees produced significantly more oleoresin during tapping compared to narrow-crowned trees. A relationship was found between turpentine yield and crown exposure, attributed to the orientation of drainage ditches. Dendrochronological analysis showed that drainage stimulates wood growth: tree-ring width increased by 9% due to the thickening of the latewood zone (by 27%) while earlywood decreased (by 15%). The wood density of pine in near-ditch areas of reclaimed forest strips increased by 5%, exceeding the regional average.

Keywords: hydraulic reclamation, drainage reclamation, peat soils, Scots pine, silvicultural operation, pine oleoresin, pine resin, wood density

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: Popov O. S., Novoselov A. S., Druzhinin F. N. (2026). Comprehensive Assessment of the Influence of Hydroforestry Reclamation and Silvicultural Measures on the Productivity of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) under the Conditions of the Vologda Region. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 82–99 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/6>.

Received 03.03.2026.

Revised 14.04. 2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Современное лесное хозяйство сталкивается с необходимостью адаптации к глобальным климатическим изменениям и возрастающему антропогенному давлению на лесные экосистемы [1, 3]. Наиболее остро эти вызовы проявляются в бореальной зоне, где леса выполняют ключевые средообразующие, водорегулирующие и климаторегулирующие функции. Вологодская область, расположенная в подзоне южной и средней тайги, характеризуется

Лесотехнический журнал 2/2026

значительной долей переувлажнённых и заболоченных земель, что делает сосновые насаждения (*Pinus sylvestris* L.) особенно чувствительными к изменениям гидрологического режима [4, 5].

На территории региона широко проводились гидроресомелиоративные работы, направленные на осушение избыточно увлажнённых лесных земель с целью повышения их продуктивности. Однако последствия осушения оцениваются неоднозначно. С одной стороны, гидромелиорация стимулирует ростовые процессы,

улучшает санитарное состояние древостоев и увеличивает текущий прирост. С другой – трансформация гидрологического режима может приводить к обеднению гидрографической сети, смене типов лесорастительных условий и снижению биоразнообразия напочвенного покрова [3, 9]. В этой связи необходима количественная оценка долговременных трендов изменения таксационных показателей и качественных характеристик древесины сосны на объектах с различным водным режимом [8, 12].

Помимо гидрологического фактора, существенное влияние на состояние и продуктивность сосновых насаждений оказывают лесохозяйственные мероприятия: рубки ухода, несплошные рубки и, в особенности, подсочка. Интенсивность выделения терпентина и общая смолопродуктивность сосны обыкновенной тесно связаны с генотипом дерева, густотой стояния, гидрологическими условиями и возрастом насаждения [14, 17]. Вместе с тем, комплексное влияние естественной заболоченности, гидромелиорации и выборочных рубок на анатомическую структуру (ширину годичного кольца, плотность древесины), ассимиляционный аппарат и смолывыделительную способность сосны остаётся изученным фрагментарно [16, 18]. В частности, остаются дискуссионными вопросы о динамике полноты насаждений и о характере изменения физико-механических свойств древесины после проведения осушительных работ и подсочки [13, 19].

Существующие методики оценки состояния лесных массивов чаще всего ограничиваются анализом отдельных таксационных показателей (высоты, диаметра, запаса) и не позволяют учесть сочетанное действие природных и антропогенных факторов. Для научного обоснования режимов лесопользования, отвечающих требованиям экологической безопасности (сохранение биоразнообразия, депонирование углерода) и хозяйственной эффективности (качество древесины, выход живицы), необходим системный подход [1, 7]. Это предполагает организацию долгосрочных наблюдений на ключевых объектах с фиксацией комплекса параметров: метрических таксационных показателей, сбежистости стволов, санитарного состояния крон, плотности древесины и смолопродуктивности [19, 20].

Цель исследования – комплексная оценка влияния гидролесомелиорации и лесоводственных мероприятий на продуктивность, качество древесины и смолывыделительную способность сосняков в условиях Вологодской области. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать многолетнюю динамику таксационных параметров сосновых

насаждений на осушенных и неосушенных участках.

2. Оценить физико-механические свойства древесины (плотность, ширину годичного кольца) в зависимости от гидрологического режима и интенсивности подсочки.
3. Изучить смолопродуктивность древостоев и её корреляцию с морфометрическими характеристиками деревьев.
4. Разработать практические рекомендации по оптимизации режимов лесопользования на переувлажнённых и осушенных территориях Вологодской области.

Материалы и методы

Объекты исследования – это сосновые древостои (или фитоценозы с доминированием сосны), произрастающие в различных лесорастительных условиях в лесном фонде Сокольского муниципального округа Вологодской области (рис. 1). В основу исследования положен сравнительный анализ постоянных пробных площадей (ПП), изначально отграниченных в 2008 году с выполнением повторных наблюдений (вплоть до 2019 г.), характеризующих следующие категории покрытых лесом земель: естественно-болотные древостои (контроль): ПП 10 – низинный тип торфяной залежи, ПП 17 – переходный тип торфяной залежи (дислокация – N59°25.70' E40°18.95', высота: 125 м). Осушаемые древостои (дислокация – N59°27.82' E40°15.33', высота: 129 м) на мезотрофных торфяных почвах, осушенные в начале 1970-х годов (ПП 1 и 5). На части лесных объектов в начале 1990-х годов проведены проходные рубки (лесохозяйственный уход). Лесные объекты после несплошной лесозаготовки, (добровольно-выборочные), ПП 6 и 7, находятся в осушаемых условиях, с евтрофно-мезотрофном типом торфяной залежи.

Предмет исследования – лесоводственно-таксационные показатели, смолопродуктивность, параметры макроструктуры и физические свойства древесины (плотность) в зависимости от гидрологического режима и антропогенного воздействия (лесоводственные приёмы, несплошное удаление древостоя, подсочка).

Полевые работы выполнялись с применением стандартизированных и общепринятых в лесном хозяйстве методик, что обеспечивало корректность последующего анализа. Расчет таксационных характеристик проведен с использованием региональных нормативно-справочных материалов. Сплошной перебор деревьев проводили по стандартным ступеням толщины с распределением стволов по классам роста и развития, согласно шкале Г. Крафта.

Для оценки влияния условий произрастания на выход терпентина проведена опытная подсочка. Работы проводились в соответствии с отраслевым

Лесотехнический журнал 2/2026

стандартом ОСТ 13-80-79. Подсочку осуществляли восходящим способом в период с июля по август. Технические параметры нанесения подновки: ширина карры – 10 см (односторонняя); шаг подновки – 12 мм; угол подновки – 45°; глубина подновки: 4 мм. Пауза вздымки составляла, в среднем, 3,5 суток. В общей сложности проведено 8 обходов. Для сбора терпентина использовали

полиэтиленовые приемники, устанавливаемые «в щап». Для нивелирования влияния диаметра штамба на выход терпентина проводили пересчет фактического выделения пасоки на нагрузку ствола в 50% от длины его окружности ($V_{50\%}$).



Рисунок 1. Схема размещения пробных площадей

Figure 1. Scheme of sample plot arrangement

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Определение количества карр на стволе:

$$N_{\text{кар.}} = \frac{b}{\pi \cdot d_{1,3}} \cdot 100 \quad (1)$$

где b – ширина карры (10 см);

$d_{1,3}$ – диаметр ствола на высоте 1,3 м, см.

Пересчет смоловыделения на эталонную нагрузку ($V_{50\%}$):

$$V_{50\%} = \frac{V_k \cdot 50}{N_{\text{кар.}}} \quad (2)$$

где V_k – фактическая масса терпентина, собранного с карры, г.

Оценка состояния ассимиляционного аппарата проводилась по оригинальной авторской методике [20], согласно которой кроны деревьев классифицировались по форме и равномерности развития на шесть типов: равномерная (Р), эллиптическая неравномерная (ЭН), а также группы, ориентированные по сторонам света (СВ, СЗ, ЮВ, ЮЗ).

С целью изучения макроструктуры древесины на каждом объекте (ПП) проводился отбор кернов при помощи возрастного бура (Haglöf, Швеция) по принципу пропорционально-ступенчатого представительства. Высота отбора – 0,6 м. Объем выборки составлял не менее 10 экз. на каждой пробной площади, что обеспечило точность опыта на минимальном уровне 10 %. Подготовка образцов включала зачистку поверхности лезвием и нанесение тонкого слоя мела для повышения контрастности границ годовичных колец. Измерение ширины годовичных колец (ШГК), а также ширины ранней (РД) и поздней (ПД) древесины выполнялось методом высокоточной сканерной денситометрии (DPI 1200). Для этого использовался сканер и графический редактор «Paint.NET версии 5.1.11» с предварительно разработанной калибровочной шкалы с ценой деления 0,05 мм.

Обработка полученных полевых материалов и расчеты выполнялись с использованием программного пакета на ПК Microsoft Excel версии 2408. Статистическая обработка данных включала расчет основных дескриптивных статистик (среднее арифметическое, ошибка среднего, стандартное отклонение), вариационный, корреляционный

анализы и расчет достоверности различия средних величин с использованием t-критерия Стьюдента для таксационных показателей и параметров макроструктуры.

Расчет базисной плотности древесины (P , кг/м³) производился аналитическим методом с использованием регрессионного уравнения (3), которое связывает плотность с шириной годовичных слоев (S , мм) и процентом поздней древесины (Bd , %):

$$P = 279,3 - 10,8 \cdot S + 4,9 \cdot Bd \quad (3)$$

Использованный косвенный метод проверялся на предмет расхождения результатов с прямым гравиметрическим методом О.И. Полубояринова не превышал 5%, что вполне допустимо для сравнительных экологических исследований.

Для выявления закономерностей влияния лесорастительных условий и антропогенных факторов на изучаемые параметры древостоев применялись методы сравнительного анализа и группировки данных. Результаты, полученные на участках с различным водным режимом и историей лесохозяйственных воздействий, сопоставлялись между собой и с контрольными (естественно-болотными) лесными объектами.

Результаты

В ходе исследования проанализированы лесоводственно-таксационные характеристики, показатели смолопродуктивности и макроструктуры древесины сосны обыкновенной на девяти пробных площадях, различающихся по гидрологическому режиму и истории антропогенного воздействия. Полученные данные позволили выявить статистически значимые различия между обозначенными группами насаждений.

Анализ таксационных показателей выявил существенную дифференциацию древостоев, в зависимости от условий произрастания (табл. 1). Наибольшей производительностью характеризовались насаждения на осушенных землях (ПП 1 и 5), где средний запас ствольной древесины достигал 320–340 м³/га, что на 30–35 % выше, чем на контрольных заболоченных участках (ПП 10 и 17). Гидромелиорация на мезотрофных почвах позволила увеличить периодический прирост за последние 40–50 лет после проведения работ.

Silvicultural and inventory characteristics of the study objects

Номер ПП Sample plot №	Шифр типа леса Forest type code	Состав древостоя Stand composition	Древесная порода Tree species	Средние Average		Густота, экз./га Density, trees/ha	Полнота Relative density		Запас сырастающих, м³/га Growing stock, m³/ha
				диаметр, см diameter, cm	высота, м height, m		абсолютная, м²/га basal area, m²/ha	относительная relative	
1	С. чер.-зм. ос. Pine forest, bilberry–green moss, drained	10С, ед. Е и Б 10Р, single S and B	С Р	25	24	820	37	0,9	400
2	С. чер.-зм. ос. Pine forest, bilberry–green moss, drained	10С, ед. Б 10 Р, single B	С Р	23	24	920	47	1,2	423
3	С. чер.-зм. ос. Pine forest, bilberry–green moss, drained	10С + Е, ед. Б 10Р + S, single B	С Р	24	24	730	34	0,9	355
4	С. чер.-зм. ос. Pine forest, bilberry–green moss, drained	9С1Б + Е 9Р1В + S	С Р	25	22	660	34	0,9	351
			Б В	10	16	420	4	0,2	28
5	С. бр.-зм. ос. Pine forest, bilberry–green moss, drained	9С1Е + Б 9Р1S + B	С Р	26	23	660	36	1,0	331
			Е S	12	11	460	6	0,3	34
6	С. чер.-зм. ос. Pine forest, bilberry–green moss, drained	9С1Б, ед. Е 9Р1В, single S	С Р	22	20	1410	60	1,7	425
			Б В	11	13	835	8	0,4	52
7	С. чер.-зм. ос. Pine forest, bilberry–green moss, drained	8С2Б, ед. Е 8Р2В, single S	С Р	22	20	920	36	1,0	323
			Б В	19	20	375	10	0,4	89
8	С. чер. ос. Pine forest, bilberry type, drained	10С, ед. Б 10Р, single B	С Р	22	20	1360	56	1,5	536
9	С. чер. ос. Pine forest, bilberry type, drained	10С, ед. Б 10Р, single B	С Р	23	21	1260	57	1,5	567
10	С. сф.-разн. Pine forest, sphagnum– forb	10С+Б 10Р + В	С Р	21	21	740	27	0,7	270
17	С. куст.-сф. Pine forest, dwarf shrub– sphagnum	10С+Б 10Р + В	С Р	20	22	1020	14	0,4	143

Примечание: жирным обозначены максимумы по столбцам

Note: bold indicates column maxima

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ структуры древостоев по шкале Г. Крафта выявил существенные различия в ценоотическом положении деревьев в зависимости от

лесорастительных условий и антропогенного воздействия. Максимальные значения диаметров на высоте груди зафиксированы у деревьев,

относящихся к высшим классам, в частности к «господствующим», «лидерам» (исключительно господствующим) и «согосподствующим». Их наибольшая концентрация отмечена в приканальном положении осушаемых областей. В частности, на пробных площадях, пройденных лесоводственным уходом в сочетании с гидролесомелиорацией, размерные характеристики стволов в этих категориях были максимальными для всей выборки (табл. 2).

Кроме этого, установлена зависимость угнетенной части древостоя (IV–V классы) от микрорельефа: наиболее крупные экземпляры из числа отстающих в росте преобладали в межканальном положении осушаемого пространства. Это косвенно свидетельствует о сохранении градиента условий увлажнения даже спустя десятилетия после осушения.

Таблица 2

Ведомость распределения средних таксационных диаметров деревьев сосны (см) по классам роста и развития Крафта на объектах исследования

Table 2

Distribution of average mensuration diameters of Scots pine (cm) by Kraft growth and development classes across study sites

Категории роста и развития Growth categories	Номер ПП, лесоводственные мероприятия, положение (*) Sample plot №, silvicultural treatment, location (*)								
	1, ПРХ. Л/У, ПК 1 improvement thinning (silvicultural tending) near-ditch	2, ПРХ. Л/У, МК 2 improvement thinning (silvicultural tending) mid-ditch (center) (MC)	3, ПРХ. Л/У, ПК 3 improvement thinning (silvicultural tending) near-ditch (PC)	4, ПРХ. Л/У, ПК 4 improvement thinning (silvicultural tending) near-ditch (PC)	5, ПРХ. Л/У, МК 5 improvement thinning (silvicultural tending) mid-ditch (center) (MC)	6, Д-В Р, ПК 6 voluntary-selective felling near-ditch (PC)	7, Д-В Р, МК 7 voluntary-selective felling mid-ditch (center) (MC)	8, ПК 8, near-ditch (PC)	9, МК 9, mid-ditch (center) (MC)
господствующие dominant	23	24	25	24	23	24	23	21	20
лидеры leaders	28	28	30	27	27	27	29	28	26
согосподствующие codominant	18	19	19	17	12	17	17	16	15
угнетённые деревья suppressed	9	7	8	-	-	13	12	14	16
сухостой текущий current deadwood	20	-	16	15	12	13	14	15	14
сухостой прошлых лет old deadwood	15	14	15	16	14	13	13	11	11

Примечание: жирным обозначены максимумы по строкам, * – местоположение на осушаемом пространстве между каналами (ПК – приканальное, МК – межканальное (в центре)), ПРХ. Л/У (проходная рубка ухода (лесоводственный уход)), НЗ (добровольно-выборочная), К – контрольный древостой

Note: bold indicates row maxima; * – location in the drained space between ditches (PC – near-ditch, MC – mid-ditch (center)); PRKh. L/U – improvement thinning (silvicultural tending); NZ – voluntary-selective felling; K – control stand

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Полученное распределение встречаемости деревьев по категориям Крафта (рис. 2) показало, что доля господствующих особей закономерно выше на всех участках с гидролесомелиорацией по сравнению с естественно-заболоченными участками. Максимальное долевое участие деревьев I–II

классов отмечено в насаждениях, где осушительная сеть дополнялась рубками ухода, а также в древостоях после несплошной лесозаготовки. Наименьшая доля согосподствующих и исключительно господствующих деревьев, а также максимальный процент угнетенной части

зафиксирован в межканальном положении после первого приема несплошной заготовки леса (ПП 7). Это, вероятно, связано с неравномерным снятием

полога и временным ухудшением условий для оставленных деревьев на переувлажненных микроповышениях.

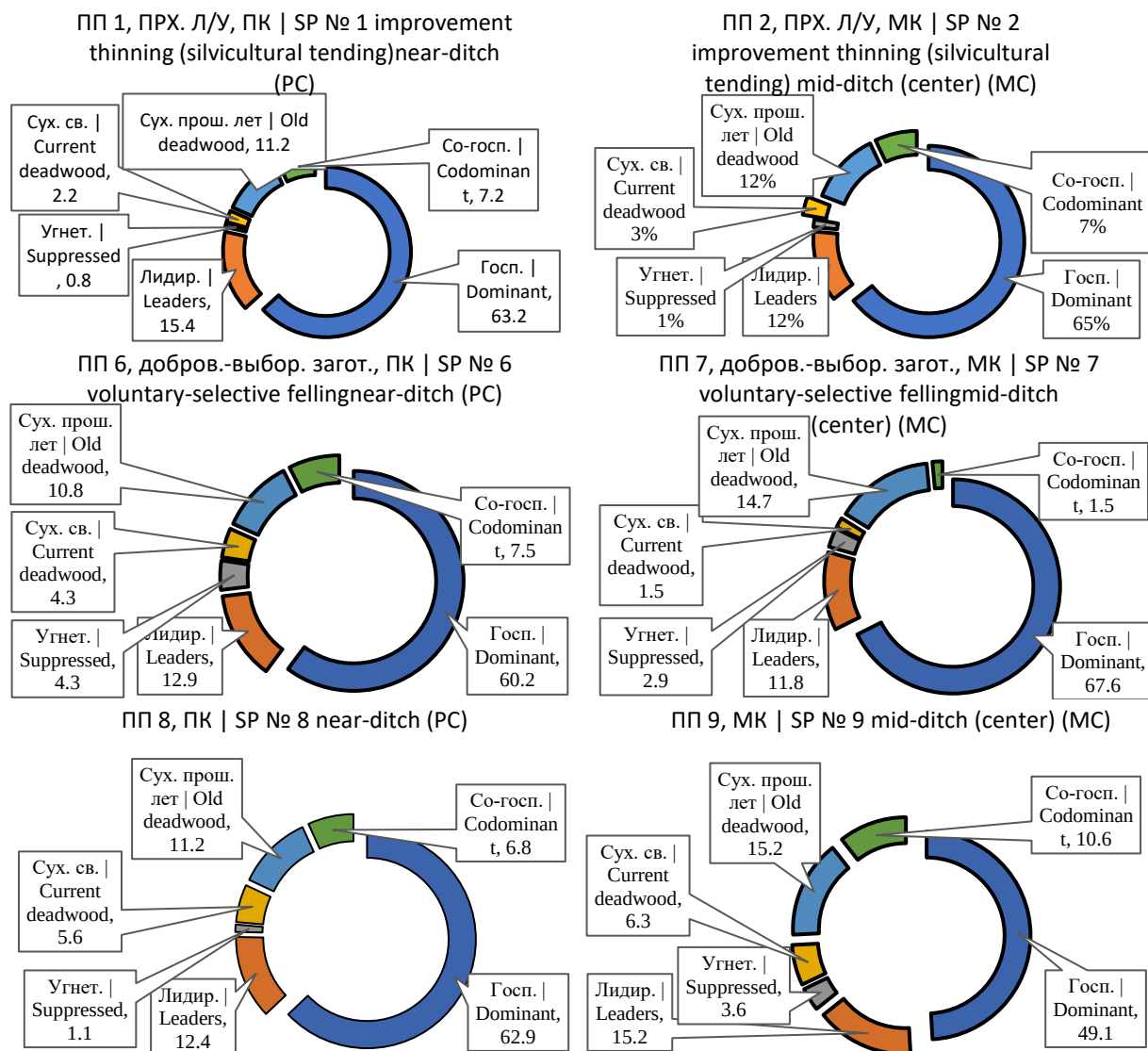


Рисунок 2. Распределение деревьев в относительных величинах по классам роста и развития Крафта на объектах исследования (местоположение на осушаемом пространстве между каналами (ПК – приканальное, МК – межканальное (в центре)), ПРХ. Л/У (проходная рубка ухода (лесоводственный уход)), Д-В Р (добровольно-выборочная рубка), К – контрольный древостой)

Figure 2. Relative distribution of trees by Kraft growth and development classes across study sites (location in the drained space between ditches: PC – near-ditch, MC – mid-ditch (center)); PRKh. L/U – improvement thinning (silvicultural tending); V-S F – voluntary-selective felling; K – control stand)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

В сообществе лесоводов принято считать, что интенсивность выделения терпентина – это объективный физиологический маркер, отражающий виталитет деревьев. В связи с этим особый интерес представляет анализ выхода терпентина, приведенного к стандартизированной 50-процентной нагрузке карры. Наибольшая продуктивность в рамках опыта зафиксирована на

объектах, пройденных рубками ухода. Средний объем выделения терпентина составил 239 г, что на 11 % превышает аналогичный показатель в древостоях после добровольно-выборочных рубок и на 9 % – в осушаемых насаждениях без лесоводственных уходов (табл. 3). В сравнении с болотными условиями (ПП 17) преимущество имеют осушаемые лесные объекты с проведенным

лесоводственным уходом, выборочными рубками (превышение достигает 44, 39 и 40 % соответственно). Отличие отдельного выделения терпентина с карры со средневзвешенным параметром (229 ± 16 г в осушаемых сосняках) статистически удалось доказать в двух случаях. Полученные данные: $t_{\text{факт.}}=0,94$; $t_{\text{ст.}}=0,68$ (с контролем на евтрофных торфяных почвах различие

доказано на 50% уровне). На уровне в 90 % удалось доказать превышение массы выделившегося терпентина у сосняков вблизи осушительного канала после проведения в них ухода – ПП 4 ($t_{\text{факт.}}=1,83$; $t_{\text{ст.}}=1,68$). На объекте с олиготрофной залежью различие достаточно явное (43%), что позволяет не выполнять стат. расчёта.

Таблица 3

Выделение соснового терпентина и его зависимость от таксационного диаметра

Table 3

Collection of Scots pine turpentine and its relationship with mensuration diameter

Номер ПП, Лесоводственные мероприятия, местоположение (*) Plot №, treatment, location (*)	Средний вес терпентина при нагрузке стволов каррами 50 %, гр. $M \pm m_m$ Mean turpentine weight, 50% bark scraping, g ($M \pm m_m$)	Коэффициент изменчивости выхода терпентина, % CV of turpentine yield, %	Максимальный индивидуальный вес терпентина, гр. Maximum individual turpentine weight, g	Коэффициент корреляции (таксационный диаметр и выход терпентина с карры) ** Correlation coefficient (DBH and turpentine yield per streak) **
10, К 10, control	256±23	63	865	$r = 0,3$; $t_r = 2,3$
17, К 17 control	132±13	70	586	$r = 0,3$; $t_r = 2,4$
1, ПРХ.Л/У, ПК 1, improvement thinning (silvicultural tending) near-ditch (PC)	245±20	58	683	$r = 0,5$; $t_r = 4,3$
2, ПРХ.Л/У, МК 2, improvement thinning (silvicultural tending) mid-ditch (center) (MC)	206±13	50	578	$r = 0,1$; $t_r = 1,2$
3, ПРХ.Л/У, ПК 3, improvement thinning (silvicultural tending) near-ditch (PC)	236±14	40	508	$r = 0,3$; $t_r = 2,6$
4, ПРХ.Л/У, ПК 4, improvement thinning (silvicultural tending) near-ditch (PC)	274±18	47	666	-
5, ПРХ.Л/У, МК 5, improvement thinning (silvicultural tending) mid-ditch (center) (MC)	236±18	54	534	$r = 0,3$; $t_r = 2,1$
6, Д-В Р, ПК 6, voluntary- selective felling near-ditch (PC)	218±19	61	716	$r = 0,3$; $t_r = 2,2$
7, Д-В Р, МК 7, voluntary- selective felling mid-ditch (center) (MC)	214±15	50	511	$r = 0,4$; $t_r = 2,8$
8, ПК 8, near-ditch (PC)	243±17	49	561	-
9, МК 9, mid-ditch (center) (MC)	195±17	62	483	$r = 0,3$; $t_r = 2,2$

Примечание: жирным обозначены максимумы и минимумы по столбцам, * – местоположение на осушаемом пространстве между каналами (ПК – приканальное, МК – межканальное (в центре)), ПРХ. Л/У (проходная рубка ухода (лесоводственный уход)), Д-В Р (добровольно-выборочная рубка), К – контрольный фитоценоз; ** – в опыте подсочки было задействовано от 48 до 52 деревьев на каждой ПП

Note: bold indicates column maxima and minima; * – location in the drained space between ditches (PC – near-ditch, MC – mid-ditch (center)); PRKh. L/U – improvement thinning (silvicultural tending); V-S F – voluntary-selective felling; K – control phytocoenosis; ** – tapping experiment involved 48 to 52 trees per sample plot

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ вариабельности признака показал, что минимальный разброс значений характерен для древостоев, пройденных лесоводственным уходом, что свидетельствует о выравнивании физиологического статуса деревьев под влиянием изреживания. В условиях естественного болота (ПП 17) индивидуальная изменчивость по смолопродуктивности оказалась максимальной, что, вероятно, обусловлено различной степенью угнетения особей.

Корреляционный анализ выявил тесную положительную связь между выходом терпентина и таксационным диаметром у деревьев, произрастающих в приканальной области осушаемого пространства после проходных рубок ухода. В то же время для приканального положения осушаемого сосняка без удаления части деревьев (ПП 8) подобная зависимость практически

отсутствует, что может указывать на иные лимитирующие факторы, не связанные с размерами штамбов.

Отдельно следует отметить болотный сосняк на низинной залежи (ПП 10). В нём отмечен достаточно высокий уровень выделения терпентина, сопоставимый с мелиорируемыми лесными объектами. Данный факт свидетельствует о принципиальной пригодности таких насаждений для организации подсочного производства при условии корректного выбора режима нанесения регулярных поранений.

Анализ связи между поперечной конфигурацией крон и смолопродуктивностью (табл. 4) выявил отчетливую зависимость выхода терпентина от ориентации ассимиляционного аппарата, что, вероятно, обусловлено условиями освещенности и ветрового режима на мелиорируемых участках.

Таблица 4

Выделение соснового терпентина по градациям крон

Table 4

Scots pine turpentine yield by crown classes								
Фенотипический признак (параметр кроны) Phenotypic trait (crown)	Номер ПП, лесоводственные мероприятия (*), положение Sample plot №, silvicultural treatment (*), location							
	1, 3 и 4, ПРХ, Л/У, ПК SP № 1, 3 and 4 improvement thinning (silvicultural tending) near-ditch (PC)	2 и 5, ПРХ, Л/У, МК SP № 2 and 5, improvement thinning (silvicultural tending), mid-ditch (center) (MC)	6, Д-В Р, ПК SP № 6, voluntary-selective felling, near-ditch (PC)	7, Д-В Р, МК SP № 7, voluntary-selective felling, mid-ditch (center) (MC)	8, ПК SP № 8, near-ditch (PC)	9, МК SP № 9, mid-ditch (center) (MC)	10, К (Н) SP № 10, control (N)	17, К SP № 17, control
Классы развитости крон деревьев относительно сторон горизонта Crown development classes relative to cardinal directions								
P uniform	207	-	186	-	280	165	-	86
CB NE-oriented	270	250	194	204	268	216	210	137
C3 NW-oriented	239	197	182	244	239	160	217	106
ЮВ SE-oriented	240	202	252	167	218	174	319	150
ЮЗ SW-oriented	267	242	225	252	238	218	216	114
ЭН elliptical non-uniform	248	147	262	259	238	195	211	210
Типы крон Crown types								
Узко-кронная Narrow-crowned	189	156	143	160	160	158	192	72
%	20	18	29	31	20	49	22	20
Широко-кронная Broad-crowned	267	235	248	238	264	231	274	147
%	80	82	71	69	80	51	78	80

Примечание: жирным обозначены максимумы по столбцам (первый блок) и по строкам – для второго блока таблицы, * – местоположение на осушаемом пространстве между каналами (ПК – приканальное, МК – межканальное (в центре)), ПРХ. Л/У (проходная рубка ухода (лесоводственный уход)), Д-В Р (добровольно-выборочная рубка), К – контрольный древостой.

Note: bold indicates column maxima (first block) and row maxima (second block of the table); * – location in the drained space between ditches (PC – near-ditch, MC – mid-ditch (center)); PRKh. L/U – improvement thinning (silvicultural tending); V-S F – voluntary-selective felling; K – control stand

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

В осушаемых насаждениях максимальные показатели выделения живицы зафиксированы у деревьев, кроны которых имели преимущественное развитие в северо-восточном направлении. Ориентация каналов на север определяет специфический световой режим. На лесных участках, пройденных проходными рубками, определено повышенное смоловыделение с юго-западной экспозицией крон деревьев.

В древостоях после первого приема выборочной рубки, а также на контрольном участке переходного типа болота (ПП 17) какой-либо выраженной ориентации крон у деревьев с высокой смолопродуктивностью не наблюдалось.

Лидирующие позиции здесь занимали сосны с эллиптической формой кроны без четкого доминирования какой-либо стороны света. В заболоченном сосняке на низинной залежи (ПП 10) максимальные показатели смоловыделения определены у деревьев с кронами, развитыми с юго-восточной стороны.

Анализ такого морфологического признака, как ширина кроны, показал однозначное превосходство ширококронных деревьев над узкокронными по интенсивности истечения терпентина во всех категориях насаждений. Закономерно, что наибольшая доля ширококронных экземпляров сформировалась в разреженных древостоях после лесоводственного ухода. В то же время в осушаемых фитоценозах без частичного удаления деревьев (ПП

1 и 5) отмечена повышенная встречаемость узких крон, что выступает прямым следствием высокой первоначальной густоты и, как результат, механического воздействия (охлестывания) в условиях ограниченного пространства.

Анализ пространственной структуры крон выявил существенные различия в их ориентации в зависимости от лесорастительных условий и истории лесохозяйственного освоения лесных объектов (рис. 3).

В древостоях, испытывавших эффект от гидролесомелиорации в сочетании с лесоводственным уходом, отчетливо доминируют сосны с преимущественным развитием кроны в юго-западном направлении. На участках после выборочных рубок наибольшая доля деревьев характеризуется доминирующей направленностью ассимиляционного аппарата на северо-восток. В этих насаждениях (ПП 6) зафиксирована максимальная для всей выборки встречаемость экземпляров с равномерно развитой кроной.

Микрорельеф мелиорируемых территорий также вносит коррективы в распределение признака. В приканальной полосе возрастает доля деревьев с юго-восточной ориентацией крон. По мере удаления от каналов к центру межканального пространства преобладают экземпляры деревьев, чьи кроны преимущественно более сформировались в северо-восточном направлении.

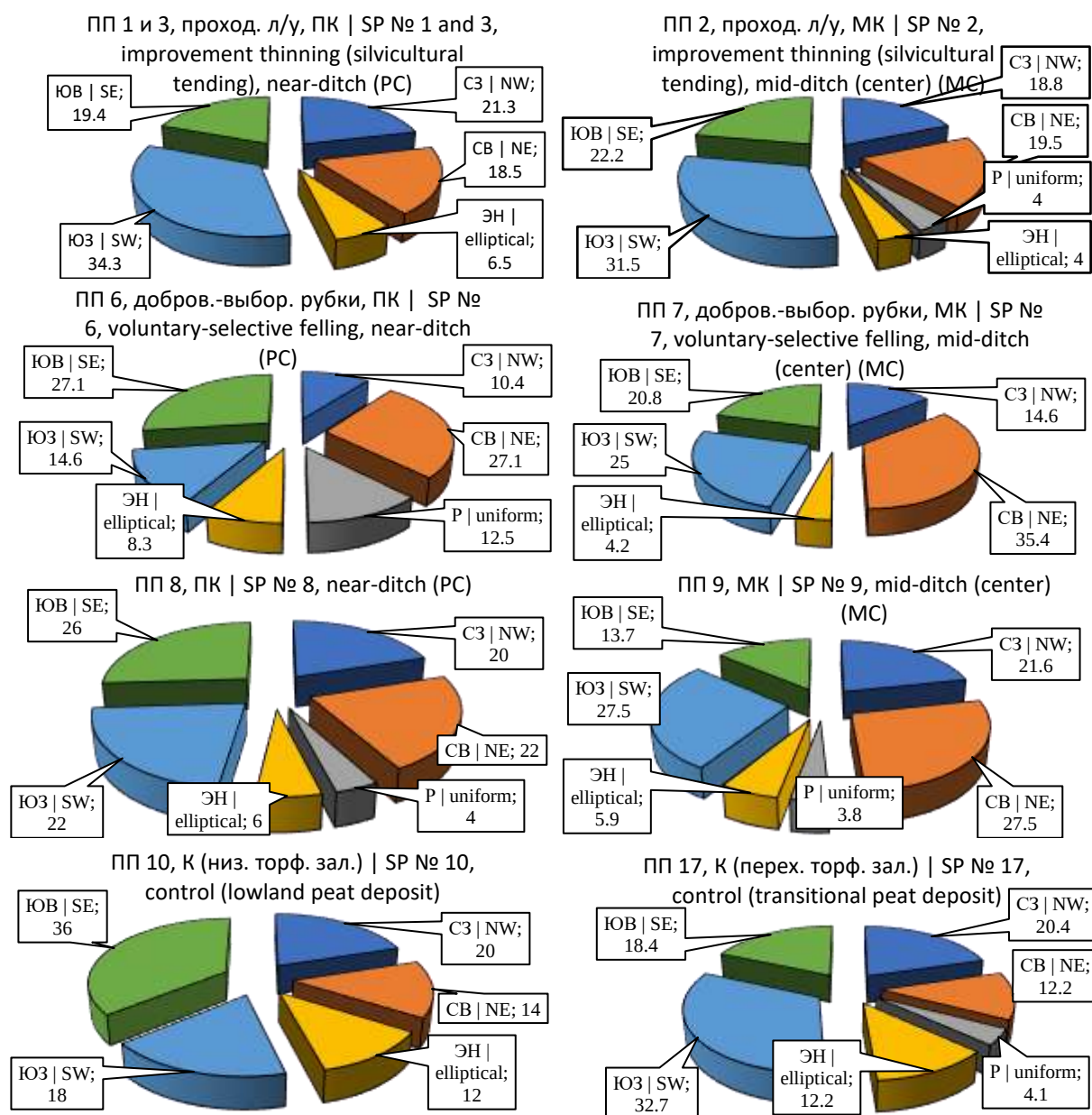


Рисунок 3. Представленность сосновых деревьев по разным классам развитости крон
Figure 3. Distribution of Scots pine trees by crown development classes

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

В естественно-болотных лесных объектах (контрольных) как на низинной (ПП 10), так и на переходной (ПП 17) торфяной залежи кроны деревьев имеют отчетливую южную ориентацию, но с различной долготной составляющей: в первом случае преобладает юго-восточное, во втором – юго-западное направление максимального развития. Анализ макроструктуры древесины (табл. 5) подтвердил ожидаемую зависимость параметров годовичных колец от трофности местообитания.

Максимальные абсолютные значения ширины годовичного слоя зафиксированы на богатых элементами питания торфяных залежах низинного типа (ПП 10). Тем не менее, несмотря на лидерство по общему радиальному приросту, доля поздней древесины в этом древостое остается невысокой и статистически не отличается от показателя, характерного для более бедной переходной залежи (ПП 17).

Параметры макроструктуры древесины сосны

Table 5

Parameters of Scots pine wood macrostructure

Номер ПП, положение Sample plot №, location	ПД, мм latewood, mm	РД, мм earlywood, mm	ППК, мм tree ring width, mm	Доля ПД в ППК, % Latewood proportion in tree ring width, %
10, К (Н) 10, control (N)	<u>0,3±0,1</u> 28,9	<u>0,8±0,1</u> 17,1	<u>1,1±0,2</u> 18,3	<u>30,0±5,0</u> 16,7
17, К 17, 10, control	<u>0,2±0,1</u> 31,8	<u>0,6±0,1</u> 21,7	<u>0,8±0,2</u> 23,2	<u>29,7±4,6</u> 15,4
8, ПК (до осушения) 8, near-ditch (PC) (before drainage)	<u>0,2±0,1</u> 27,1	<u>0,6±0,1</u> 8,5	<u>0,8±0,1</u> 10,3	<u>29,7±6,3</u> 21,3
8, ПК (после осушения) 8, near-ditch (PC) (after drainage)	<u>0,3±0,1</u> 24,6	<u>0,6±0,1</u> 10,5	<u>0,9±0,1</u> 14,2	<u>33,9±4,1</u> 12,1
9, МК (до осушения) 9, mid-ditch (center) (MC) (before drainage)	<u>0,3±0,1</u> 20,3	<u>0,7±0,1</u> 24,5	<u>0,7±0,1</u> 27,5	<u>38,0±3,4</u> 30,8
9, МК (после осушения) 9, mid-ditch (center) (MC) (before drainage)	<u>0,3±0,1</u> 48,1	<u>0,5±0,1</u> 26,8	<u>0,8±0,1</u> 32,4	<u>36,2±1,2</u> 18,1

Примечание: в знаменателе приведены коэффициенты изменчивости признаков (в %), жирным обозначены максимумы по столбцам

Note: coefficients of variation (in %) are given in the denominator; bold indicates column maxima

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Сравнительный анализ временных срезов (до и после работ по мелиорации) выявил отчетливую реакцию анатомических элементов. Осушение выступило фактором, стимулирующим формирование большей толщины поздних трахеид в кольцах (увеличение в среднем на 27 %), сформировавшихся после проведения гидролесомелиоративных работ. Это закономерно отразилось на общей ширине годичного слоя, которая возросла на 9 %.

Наиболее контрастная реакция на улучшение водно-воздушного режима проявилась в изменении соотношения между накоплениями ранних и поздних трахеид. Ширина ранней зоны, формирующейся в начале вегетационного периода, после осушения, напротив, сократилась в среднем

на 0,1 мм (или на 15 %). Такое перераспределение ассимилятов в пользу более поздних, механически прочных элементов, вероятно, связано с продлением периода активного роста во второй половине лета в условиях понижения уровня грунтовых вод.

Анализ расчетной плотности древесины выявил ряд закономерностей, связанных с трофностью болотных местообитаний и гидрологическим режимом территории (рис. 4). В естественно-болотных условиях различия между древостоями на низинной (ПП 10) и переходной (ПП 17) торфяными залежами оказались минимальными. Показатель плотности на богатом органоминеральными веществами участке лишь на <1 % уступает таковому на бедном переходном болоте.

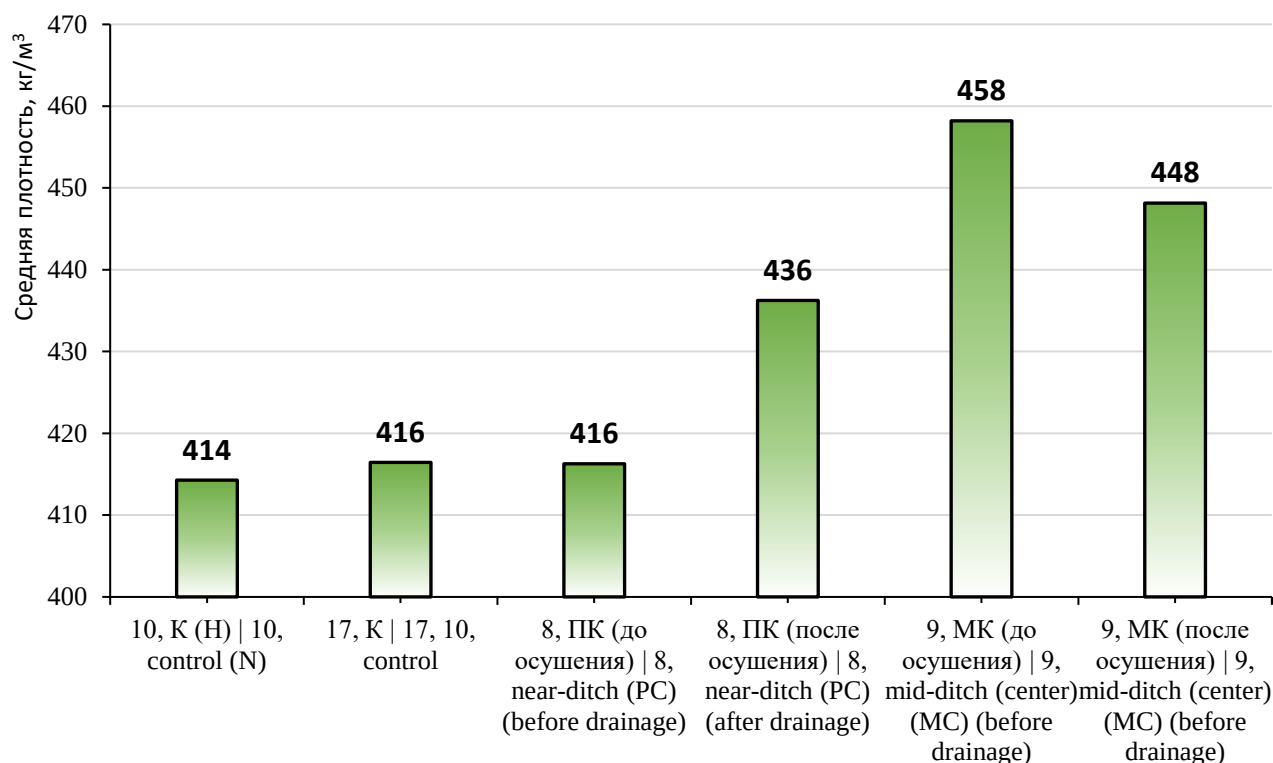


Рисунок 4. Средняя плотность древесины сосны

Figure 4. Average density of Scots pine wood

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Гидротехническая мелиорация внесла существенные коррективы в формирование физических свойств древесины. Характер этих изменений зависит от положения дерева относительно осушительной сети. В приканальной полосе, где эффект осушения проявляется максимально, плотность древесины сосны возросла на 5 % по сравнению с периодом роста в анаэробных условиях до мелиорации. В центральной части межканального пространства положительный эффект выражен слабее. Превышение составляет лишь около 3 %. В среднем по всему осушаемому массиву прирост плотности после лесосошения не превышает <1 %, что может указывать на неоднородность отклика древостоев.

Сравнение с региональными нормативами демонстрирует высокий потенциал исследованных насаждений. Плотность древесины в осушаемых сосняках Сокольского муниципального округа устойчиво превосходит средние показатели, характерные для Архангельской области (395 ± 2 кг/м³), что может быть обусловлено как локальными почвенно-климатическими условиями, так и особенностями возрастной структуры древостоев. Обобщая данные по всему спектру условий, следует отметить, что на мелиорируемых землях плотность древесины в среднем на 6 % выше, чем на

заболоченных участках, не затронутых гидротехническими работами. При этом общая изменчивость признака остается невысокой (коэффициент вариации $S \approx 7\%$). Исключение составляет ретроспективный анализ кернов, соответствующих периоду роста в центре осушаемого пространства до проведения мелиорации. Здесь вариабельность достигает 13 %, что, вероятно, отражает исходную гетерогенность гидрологического режима. Наиболее однородны по плотности древостои неосушенного контроля ($S \approx 5\%$), что характерно для стабильных условий переувлажнения.

Выводы

Комплексные исследования на объектах долгосрочного влияния гидротехнической мелиорации в Сокольском муниципальном округе Вологодской области позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1) Проведение гидротехнической мелиорации на торфяных почвах переходного типа, даже спустя десятилетия при отсутствии реконструкции канальной сети (сохраняющей удовлетворительное рабочее состояние), обеспечило ожидаемый положительный лесоводственный эффект. Это выразилось в достоверном увеличении запасов стволовой

древесины на осушаемых лесных территориях по сравнению с естественно-заболоченными аналогами.

2) Лесоводственные мероприятия (уходы и несплошные заготовки древесины), проведенные на оне действующей мелиорации, способствовали оптимизации структуры древостоя. Отмечено увеличение доли деревьев высших классов роста и развития по Крафту (лидирующих и господствующих), что свидетельствует об улучшении условий местопроизрастания и усилении конкурентных позиций.

3) Анализ смолопродуктивности выявил два типа насаждений, пригодных для организации подсочного производства: естественные сосняки на низинных (евтрофных) торфяниках и осушаемые древостои, пройденные проходной рубкой. В обоих случаях получены максимальные значения по этому показателю.

4) Установлена устойчивая морфологическая закономерность: независимо от типа лесорастительных условий, наиболее высокие показатели выхода терпентина установлены у ширококронных деревьев. Этот признак может служить дополнительным селекционным критерием при отборе деревьев-кандидатов для промышленной подсочки.

5) Выявлена связь смолопродуктивности с экспозицией кроны, обусловленная ориентацией осушительной сети. При направлении каналов по

линии «север-юг» максимальные значения по выходу терпентина определены для осушаемых древостоев без лесоводственных уходов для деревьев с кронами, развитыми в северо-восточном направлении. В насаждениях, пройденных проходной рубкой, наилучшие показатели демонстрируют особи с юго-западной ориентацией крон.

6) Анализ макроструктуры древесины подтвердил высокую чувствительность радиального прироста к изменению гидрологического режима. В период после осушения определено увеличение толщины поздних трахеид на 27 %, что сопровождалось ростом общей ширины годичного кольца (в среднем на 9 %). При этом ширина ранней древесины, напротив, сократилась на 15 %, что указывает на перераспределение ассимилятов в пользу более поздней, механически прочной зоны.

7) Плотность древесины как показатель ее качества под влиянием искусственного дренирования в среднем по осушаемому массиву увеличилась на 1% по сравнению с периодом до осушения. Максимальный прирост плотности (до 5 %) наблюдается в приканальных зонах с наиболее интенсивным дренажом. Установлено, что по абсолютным значениям плотности древесины исследуемые сосняки в Сокольском муниципальном округе превосходят среднерегиональные показатели по Архангельской области.

Список литературы

1. Богданов А.П., Цветков И.В., Карабан А.А. [и др.] Исследования радиального прироста хвойных древостоев на объектах длительного наблюдения под влиянием осушения // *Journal of Agriculture and Environment*. – 2024. – № 9(49). – DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.49.5>.
2. Ding X. [et al.]. Genetic analysis and elite tree selection of the main resin components of slash pine. *Front. Plant Sci.* – 2023. – 14: 174. – DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079952>
3. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н. Лесопользование в осушаемых лесах : монография. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 168 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fyzcmy>
4. Пахучий, В. В, Пахучая Л.М. Особенности реакции старовозрастной сосны при осушении водораздельной территории в Республике Коми // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2025. – № 6(408). – С. 77-91. – DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-77-91>.
5. Ермохин М.В, Барсукова Т.Л., Углянец С.А. и др. Динамика и состояние болотных и заболоченных сосновых лесов Беловежской пуши // *Ботаника. Исследования*. – 2021. – № 50. – С. 171-194. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50236035>.
6. Gurau V. [et al.]. Robot operations for pine tree resin collection. *Technologies*. – 2021. – 9 (4): 79. – DOI: <http://doi.org/10.3390/technologies9040079>
7. Pikkarainen L., Strandman H., Vento E. [et al.]. 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>
8. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Оптимизация размещения осушительных каналов в связи с географическим положением объектов гидромелиорации в Республике Коми // *Journal of Agriculture and Environment*. – 2025. – № 2(54). – DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.11>.
9. Бабилов Б. В., Субота М.Б. Гидромелиорация в лесном хозяйстве: история научных исследований // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2022. – № 3(387). – С. 103-118. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-103-118>.
10. Дружинин Н.А. [и др.]. Особенности и лесоводственная эффективность проходных рубок в осушаемых лесах // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2023. – № 242. – С. 28–42. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50504394>
11. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н. Возобновление леса и возрастное строение древостоев на торфяных почвах. – Вологда: Полиграф-Периодика, 2021. – 118 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ebokop>
12. Загородский М. А., Третьяков С.В., Коптев С.В. Плотность древесины сосны обыкновенной в осушаемом сосняке сфагновом // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2023. – № 2(392). – С. 160-171. – DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-160-171>.
13. Третьяков С.В., Коптев С.В., Давыдов А.В. и др. Качество древесины осушаемых северотаежных сосняков Архангельской области, определенное экспресс-методом // *Сибирский лесной журнал*. – 2023. – № 4. – С. 64-74. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230407>.
14. Штрахов С. Н., Данилов Д.А., Зайцев Д.А. Особенности смолы выделения в древостоях сосны (*Pinus sylvestris* L.) разного состава и товарной структуры в черничном типе леса // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2025. – № 252. – С. 170-187. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.252.170-187>.
15. Aloui F. [et al.]. Assessment of biological activities of resin extracted from Tunisian pine forests. *Pak. J. Bot.* – 2022. – 54 (2): 97–102. – DOI: [http://doi.org/10.30848/PJB2022-2\(45\)](http://doi.org/10.30848/PJB2022-2(45))
16. Штрахов С. Н., Данилов Д.А., Зайцев Д.А. Динамика прироста и плотность древесины сосны после подсадки в брусничном типе леса в Ленинградской области // *Лесохозяйственная информация*. – 2024. – № 3. – С. 47-56. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.03>.
17. Штрахов С.Н., Данилов Д.А., Зайцев Д.А. Оценка смолопродуктивности спелых чистых сосновых древостоев в Ленинградской области // *Труды СПбНИИЛХ*. – 2024. – Вып. 3 (15). – С. 58–66. – DOI: <http://doi.org/10.21178/2079-6080.2024.3.78>.
18. Garcia-Forner N. [et al.]. Growth-defence tradeoffs in tapped pines on anatomical and resin production. *For. Ecol. Manag.* – 2021. – 496: 119406. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119406>
19. Zaluma A. [et al.]. Long-term pathological consequences of resin tapping wounds on stems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*. – 2022. – 36 (5): 1507–1514. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s00468-022-02307-y>
20. Инишева Л. И., Шайдак Л.В., Бабилов Б.В. Гидрологический и газовый режим болот в условиях лесомелиорации // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2020. – № 6. – С. 39-44. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44417888>

References

1. Bogdanov A. P., Tsvetkov I. V., Karaban A. A. [et al.]. *Issledovaniya radial'nogo prirosta khvoynykh drevostoev na ob'ektakh dlitel'nogo nablyudeniya pod vliyaniem osusheniya* [Studies of radial increment of coniferous stands at long-term observation sites under the influence of drainage]. Journal of Agriculture and Environment. 2024;(9(49)). (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.60797/JAE.2024.49.5>.
2. Ding X., Li Y., Zhang Y. [et al.]. *Genetic analysis and elite tree selection of the main resin components of slash pine*. Front. Plant Sci. 2023; 14: 1079952. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079952>.
3. Druzhinin N. A., Druzhinin F. N. *Lesopol'zovanie v osushaemykh lesakh: monografiya* [Forest use in drained forests: monograph]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024. 168 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fyzcmly>.
4. Pakhuchiy V. V., Pakhuchaya L. M. *Osobennosti reakcii starovozrastnoj sosny pri osushenii vodorazdel'noj territorii v Respublike Komi* [Peculiarities of the response of old-growth pine during drainage of a watershed area in the Komi Republic] Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal = News of Higher Education Institutions. Forestry Journal. 2025; № 6(408): 77-91. (In Russ.) – DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-77-91>.
5. Ermohin M.V., Barsukova T.L., Uglyanec S.A. [et al.]. *Dinamika i sostoyanie bolotnykh i zabolochennykh sosnovykh lesov Belovezhskoj pushchi* [Dynamics and condition of swamp and marshy pine forests of Belovezhskaya Pushcha]. Botanika. Issledovaniya = Botany. Research. 2021; (50); – 171-194. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50236035>.
6. Gurau V. [et al.]. *Robot operations for pine tree resin collection*. Technologies. 2021;9(4):79. DOI: <http://doi.org/10.3390/technologies9040079>.
7. Pikkarainen L., Strandman H., Vento E. [et al.]. 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>
8. Pakhuchiy V. V., Pakhuchaya L. M. *Optimizatsiya razmeshcheniya osushitel'nykh kanalov v svyazi s geograficheskim polozheniem ob'ektov gidromelioratsii v Respublike Komi* [Optimization of drainage canal placement in relation to the geographical location of drainage facilities in the Komi Republic]. Journal of Agriculture and Environment. 2025;(2(54)). (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.11>.
9. Babikov B. V., Subota M.B. *Gidromelioratsiya v lesnom hozyajstve: istoriya nauchnykh issledovanij* [Hydromelioration in forestry: history of scientific research]. // Lesnoj zhurnal = News of Higher Education Institutions. Forestry Journal. 2022; 3(387): 103-118. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-103-118>.
10. Druzhinin N. A. [et al.]. *Osobennosti i lesovodstvennaya effektivnost' prokhodnykh rubok v osushaemykh lesakh* [Features and silvicultural efficiency of thinning cuttings in drained forests]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Proceedings of the Saint Petersburg State Forest Technical University. 2023;(242): 28-42. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50504394>.
11. Druzhinin N. A., Druzhinin F. N. *Vozrozhdenie lesa i vozrastnoe stroenie drevostoev na torfyanikh pochvakh* [Forest regeneration and age structure of stands on peat soils]. Vologda: Poligraf-Periódika, 2021. 118 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ebokop>.
12. Zagorodskij M. A., Tret'yakov S.V., Koptev S.V. *Plotnost' drevesiny sosny obyknovЕННОj v osushaemom sosnyake sfagnovom* [Wood density of Scots pine in a drained sphagnum pine forest] Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal = News of Higher Education Institutions. Forestry Journal. 2023; 2(392): 160-171. – DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-160-171>.
13. Tret'yakov S.V., Koptev S.V., Davydov A.V. [et al.]. *Kachestvo drevesiny osushaemykh severotaezhnykh sosnyakov Arhangel'skoj oblasti, opredelennoe ekspress-metodom* [The quality of wood from drained northern taiga pine forests in the Arkhangelsk region, determined by an express method]. Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Forestry Journal. 2023; № 4; 64-74. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230407>.
14. SHtrahov S. N., Danilov D.A., Zajcev D.A. *Osobennosti smolovydeleniya v drevostoyakh sosny (Pinus sylvestris L.) raznogo sostava i tovarnoj struktury v chernichnom tipe lesa* [Features of resin secretion in pine (Pinus sylvestris L.) stands of different composition and commodity structure in the blueberry forest type] // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Proceedings of the Saint Petersburg State Forest Technical University. 2025; (252): 170-187. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.252.170-187>.
15. Aloui F., Baraket M., Ben Salem E. [et al.]. *Assessment of biological activities of resin extracted from Tunisian pine forests*. Pak. J. Bot. 2022;54(2):97-102. DOI: [http://doi.org/10.30848/PJB2022-2\(45\)](http://doi.org/10.30848/PJB2022-2(45)).
16. SHtrahov S. N., Danilov D.A., Zajcev D.A. *Dinamika prirosta i plotnost' drevesiny sosny posle podsochki v brusnichnom tipe lesa v Lenin-gradskoj oblasti* [Dynamics of growth and density of pine wood after tapping in lingonberry forest in the Leningrad region]. Forestry information. 2024; (3): 47-56. DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.03>.

17. Shtrakhov S. N., Danilov D. A., Zaytsev D. A. *Otsenka smoloproduktivnosti spelykh chistyykh sosnovykh drevostoev v Leningradskoy oblasti* [Assessment of resin productivity of mature pure Scots pine stands in the Leningrad region]. Trudy SPbNIILKh = Proceedings of SPbNIILH. 2024;3(15):58-66. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.21178/2079-6080.2024.3.78>.
18. Garcia-Forner N. [et al.]. *Growth-defence tradeoffs in tapped pines on anatomical and resin production*. For. Ecol. Manag. 2021;496:119406. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119406>.
19. Zaluma A. [et al.]. *Long-term pathological consequences of resin tapping wounds on stems of Scots pine (Pinus sylvestris L.)*. Trees. 2022;36(5):1507-1514. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00468-022-02307-y>.
20. Inisheva L. I., SHajdak L.V., Babikov B.V. *Gidrologicheskij i gazovyy rezhim bolot v usloviyah lesomelioracii* [Hydrological and gas regime of swamps under forest reclamation conditions]. Melioraciya i vodnoe hozyajstvo = Land reclamation and water management. 2020; (6): 39-44. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44417888>

Сведения об авторах

✉ **Попов Олег Сергеевич** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесного хозяйства ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина», ул. Шмидта, 2, с. Молочное, гор. округ г. Вологда, 160555, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

Новосёлов Анатолий Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры Географии и рационального природопользования ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», ул. Ленина, 15, г. Вологда, 160000, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>, e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru.

Дружинин Фёдор Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой лесного хозяйства ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина», ул. Шмидта д. 2, с. Молочное, г. Вологда, 160555, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4645-4270>, e-mail: druzhinin@mail.ru.

Information about the authors

✉ **Oleg S. Popov** – Cand. Agr. Sci., Associate Professor of the Department of Forestry, Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, 2 Schmidt St., Molochnoye, Vologda Urban Okrug, 160555, Russian Federation, 160555, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

Anatoly S. Novoselov – Cand. Agr. Sci., Associate Professor of the Department of Geography and Rational Nature Management, Vologda State University, 15 Lenin Street, Vologda, 160000, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>, e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru.

Fedor N. Druzhinin – Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Forestry Department of the Vologda State Dairy Academy named after N.V. Vereshchagin, Schmidt str., 2, Molochnoye village, Vologda, 160555, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4645-4270>, e-mail: druzhinin@mail.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author

Оценка стабильности развития тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях массового поражения листовой ржавчиной

Елена М. Рунова¹, runova0710@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>

Ольга А. Пузанова¹, puzanova-olga@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9681-5041>

Ольга И. Новоселова¹, novoselova.o.i@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0913-2865>

¹ ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», ул.Макаренко, 40, г. Братск, Иркутская обл., 665709, Российская Федерация

Методы флуктуирующей асимметрии довольно часто используются для оценки стабильности развития насаждений в условиях промышленного загрязнения городских территорий. Цель исследования - оценить стабильность развития насаждений тополя бальзамического методами флуктуирующей асимметрии листьев неформованных, формованных деревьев и поросли, ослабленных листовой ржавчиной и бурой пятнистостью в различных районах Братска Иркутской области. В исследованиях использовался метод флуктуирующей асимметрии по методике В.М. Захарова, а также по методике Е.В. Авдеевой. Братск является сложной городской агломерацией, в которой жилые районы удалены друг от друга на десятки километров, поэтому оценивать степень стабильности развития деревьев тополя бальзамического от уровня загрязнения возможно в высокой степени достоверности. Исследования проводились в течение 2023-2024 годов для различных категорий деревьев: неформованных и формованных деревьев и поросли, которую тополь дает в больших количествах. Установлено, что поражение тополя бальзамического листовой ржавчиной и бурой пятнистостью является решающим фактором, влияющим на стабильность развития насаждений, при этом, влияние формовки и уровень загрязнения больных насаждений не оказывает, как обычно существенного влияния на показатели флуктуирующей асимметрии. При этом, в первый год массового заболевания тополей листовой ржавчиной не сказался на стабильности развития, а в последующие годы после эпифитотии произошло сильное ослабление деревьев, выражающееся в ранней дефолиации деревьев, приведшее к критическому состоянию стабильности развития. Оценка стабильности развития деревьев в данном случае малоэффективна. Основным фактором, влияющим на стабильность развития городских насаждений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), пораженных листовой ржавчиной тополя и бурой пятнистостью листьев, является фактор ослабления жизненного состояния деревьев под воздействием патогенов, что приводит к потере декоративности растений, ранней дефолиации и потере симметрии в листовых пластинках.

Ключевые слова: стабильность развития, флуктуирующая асимметрия, тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.), листовая ржавчина тополя, бурая пятнистость

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: Рунова, Е. М. Оценка стабильности развития тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях массового поражения листовой ржавчиной / Е. М. Рунова, О. А. Пузанова, О. И. Новоселова // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С.100–117. – Библиогр.: с. 114–117 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/7>.

Поступила 25.03.2026. Пересмотрена 30.04.2026. Принята 15.05. 2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Evaluation of the stability of the balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) under conditions of mass leaf rust infestation

Elena M. Runova¹, runova0710@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>

Olga A. Puzanova¹, puzanova-olga@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9681-5041>

Olga I. Novoselova¹, novoselova.o.i@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0913-2865>

¹ Bratsk State University, 40 Makarenko Street, Bratsk, Irkutsk Region, 665709, Russian Federation

Fluctuating asymmetry methods are often used to assess the stability of plantation development in the context of industrial pollution in urban areas. The aim of this study is to evaluate the stability of balsam poplar plantation development using fluctuating asymmetry methods on the leaves of unformed, formed, and weakened trees and saplings affected by leaf rust and brown spot in various areas of Bratsk, Irkutsk Region. The study used the fluctuating asymmetry method based on the methodology developed by V.M. Zakharov and E.V. Avdeeva. Bratsk is a complex urban agglomeration, in which residential areas are tens of kilometers away from each other, so it is possible to assess the degree of stability of the development of balsam poplar trees from the level of pollution with a high degree of accuracy. The studies were conducted during 2023-2024 for various categories of trees: unformed and formed trees, and the saplings that poplar produces in large quantities. It has been established that the balsam poplar's leaf rust and brown spot disease are crucial factors affecting the stability of the plantations' development, while the influence of shaping and the level of pollution in the affected plantations does not have a significant impact on the fluctuating asymmetry indicators, as is usually the case. However, in the first year of the mass leaf rust disease in the poplars, it did not affect the stability of their development, but in subsequent years after the epiphytosis, there was a significant weakening of the trees, resulting in early defoliation, which led to a critical state of stability in their development. In this case, assessing the stability of tree development is not very effective. The main factor affecting the stability of the development of urban poplar (*Populus balsamifera* L.) plantations affected by poplar leaf rust and brown leaf spot is the weakening of the trees' vitality due to pathogens, which leads to a loss of plant декоративности, early defoliation, and loss of symmetry in the leaf blades.

Keywords: *development stability, fluctuating asymmetry, poplar (Populus balsamifera L.), poplar leaf rust, brown spotting*

Funding: This study received no external funding.

Acknowledgements: The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this article.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

For citation: Runova E. M., Puzanova O. A., Novoselova O. I. (2026) Evaluation of the stability of the balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) under conditions of mass leaf rust infestation. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 100–117. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/7>.

Received 25.03.2026.

Revised 30.04.2026.

Accepted 15.05.2026. *Published online* 26.06.2026

Введение

Представители рода Тополь (*Populus*) широко используются в озеленении. Тополь по праву считается одним из самых выносливых городских деревьев. Он демонстрирует устойчивость к промышленным выбросам и сохраняет высокие темпы прироста даже в условиях неблагоприятной экологии и сурового климата. Его главная ценность для урбоэкосистем заключается в мощной способности поглощать углекислый и сернистый газ, эффективно задерживать пыль, а также противостоять агрессивному воздействию промышленных предприятий и транспорта. По продуктивности выделения кислорода в городской черте этому дереву нет равных. Кроме того, тополь активно насыщает воздух фитонцидами, подавляя рост болезнетворных бактерий. За период вегетации он продуцирует огромное количество этих летучих веществ, очищая атмосферу от загрязнений. Это незаменимая порода для озеленения оживленных трасс: тополь накапливает в себе значительные объемы выхлопных газов и тяжелых металлов, при этом совершенно нетребователен к составу грунта [1-4].

Ключевым фактором, обеспечившим тополи бальзамическому преимущество в озеленении городов Сибири, является его быстрый

рост и высокая морозостойкость: уже к пяти годам дерево достигает значительных размеров и способен выдерживать морозы до -50°C . Однако при всей своей полезности, с точки зрения урбоэкологии, насаждения тополя бальзамического имеют ряд серьезных минусов:

- Из-за специфики строения древесины стволы крайне уязвимы к повреждениям.
- Продолжительность жизни здоровых деревьев в условиях загазованности, особенно вблизи автострад, относительно мала.
- С возрастом древесина становится хрупкой, что приводит к обламыванию ветвей и падению стволов при сильном ветре.
- Тополиный пух, аккумулирующий пыльцу цветущих растений, превращается в мощный аллерген, а его скопления создают пожарную опасность [2,4].

В Иркутской области основой городских зеленых массивов является тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.). Он формирует основу садов и парков, используются при озеленении придомовых территорий и внутриквартальных скверов, а также создает тенистые аллеи как вдоль пешеходных маршрутов, так и вдоль оживленных улиц. По данным авторов [2-4] тополь

бальзамический занимает более 67% от общего количества древесных растений городского ассортимента.

Братск расположен в центре Восточно - Сибирского региона РФ на пересечении важнейших коммуникаций, связывающих европейский и азиатский континенты с Севером Восточной Сибири и Якутии, что является основой для его экономического, социального и культурного развития. Город Братск представляет собой разрозненные жилые массивы, находящиеся на значительном удалении друг от друга [5].

Климат города, как и всей Иркутской области – резко континентальный. Наиболее теплым месяцем является июль +18 градусов, с абсолютным максимумом +37 градусов. Самые низкие температуры наблюдаются в январе -21,2 градуса, с абсолютным минимумом -57 градусов. Глубина промерзания грунта составляет 3м [5]. Братск отнесен к городам с неблагоприятной экологической обстановкой. Крупные предприятия города (ПАО «РУСАЛ Братск»; Братский завод ферросплавов; Братский лесопромышленный комплекс (ОАО Группа «Илим»); ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго») выбрасывают в атмосферу города твердые и газообразные выбросы, превышающие нормы ПДК. На уровень загрязнения атмосферного воздуха влияют в первую очередь концентрации общераспространённых загрязняющих веществ – сера диоксида, азота диоксида, взвешенных веществ и оксида углерода; превышения ПДК регистрируются также в отношении других веществ – гидрофторида, формальдегида, фенола, бенз(а)пирена [5].

Тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) произрастает во всех районах города и может служить объектом исследований флуктуирующей асимметрии для оценки стабильности развития

растений и качества окружающей среды. Поскольку тополь в городских посадках подвергается обрезке крон, часто радикальной, оценка состояния окружающей среды проводилась отдельно на неформованных деревьях, формованных деревьях и поросли, так как тополь бальзамический отличается высокой порослевой способностью, что делает данный вид в условиях Братска потенциально инвазионным. Кроме этого, начиная с 2023 года, насаждения тополя бальзамического в Иркутской области были массово поражены листовой ржавчиной тополя (ЛРТ) (возбудитель - *Melampsora larici-populina* Kleb.), что привело к эпифитотии, кроме этого заболевания листьев массово встречается бурая пятнистостью листьев (возбудитель — гриб *Marssonina populi* Sacc.) [6-8].

Цель исследований: оценить сравнительное состояние окружающей среды и состояния самих насаждений тополя бальзамического методами флуктуирующей асимметрии листьев неформованных, формованных деревьев и поросли, ослабленных листовой ржавчиной и бурой пятнистостью в различных районах Братска

Материалы и методы

Сравнительная оценка экологического состояния различных районов города проведена методом биоиндикации (Захаров, 2020, Авдеева, 2022) по флуктуирующей асимметрии (ФА) листовой пластины тополя бальзамического [9-20]. Проводились измерения билатеральных показателей листьев: длина второй от основания листа жилки второго порядка, расстояние между основаниями второй и первой жилок второго порядка, расстояние между окончаниями этих же жилок, угол между главной и второй жилкой второго порядка и т. д. На рисунке 1 представлена схема замеров листьев тополя.



Рисунок 1 – Схема замера билатеральных показателей листа тополя бальзамического [9,12],

1 – ширина половинки листа; 2 – длина второй жилки от основания листа; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок; 4 – расстояние между концами этих жилок; 5 – угол между главной и второй от основания жилками

Figure 1 – Scheme of measurement of the balsam poplar leaf bilaterals [9,12],

1 – width of the half-leaf; 2 – length of the second vein from the leaf base; 3 – distance between the bases of the first and second veins; 4 – distance between the ends of these veins; 5 – angle between the main and second from the base veins

Источник: собственные изображения авторов
Source: author's images

По каждому параметру определяется коэффициент асимметрии по формуле Захарова:

$$fa_i = \frac{|L_i - R_i|}{L_i + R_i}$$

Также использовалась методика оценки качества среды Е.В. Авдеевой [18-19]. Для этого в

программе AutoCAD были измерены площади левых и правых половинок листьев. По методике Е.В. Авдеевой [18,19] определены показатели асимметричности площадей листовых пластинок. В таблице 1 приведена шкала оценивания качества среды по методике Е.В. Авдеевой.

Таблица 1

Оценка качества среды по методике Авдеевой [18,19]

Table 1

Assessment of the quality of the environment according to the Avdeeva method [18,19]

Значение показателя асимметричности, % The value of the asymmetry indicator %	Оценка качества среды Environmental quality assessment
До 9 up to 9	Условная норма The conditional norm
От 9 до 10 From 9 to 10	Удовлетворительное состояние Satisfactory condition
От 10 до 11 From 10 to 11	Напряжённое состояние Tense state
От 11 до 12 From 11 to 12	Конфликтное состояние Conflict status
Более 12 More than 12	Критическое состояние Critical condition

Источник: шкала оценивания качества среды по методике Е.В. Авдеевой
Source: E.V. Avdeeva's environmental quality assessment scale

В качестве объектов исследования были выбраны листья тополя бальзамического, в следующих жилых районах:

- 1) в Центральном – улицы: Баркова, Подбельского, Энгельса, Пихтовая, Обручева, Гагарина, Свердлова, Курчатова;
- 2) в Падуне – улицы: Гидростроителей и Набережная;
- 3) в Энергетике – улицы: Приморская и Юбилейная;
- 4) в Гидростроителе – улицы: Спортивная и Орлова;
- 5) в Вихоревке – улицы: Советская и Ленина (контроль)

Сбор материала был проведен после остановки роста листьев (в августе-сентябре 2024 года), для сопоставления были использованы исследования 2023 года. Для исследований были отобраны деревья в возрасте от 15 до 20 лет, за

исключением поросли, возраст которой не превышал 3 лет. Листья были собраны из нижней части кроны дерева с максимального количества доступных веток равномерно вокруг дерева [11]. Листья собирались с неформованных и формованных деревьев, а также с поросли. На улицах, которые были взяты для исследований в Падунском жилом районе поросли не оказалось. Она была скошена вместе с травой. Все листья, собранные для одной выборки, были сложены в полиэтиленовый пакет с этикеткой, в которой указаны номер выборки, место сбора (делая максимально подробную привязку к местности), дата сбора [9]. Каждая выборка включает в себя 40 листьев: по 10 листьев с 4 растений, всего 1840 листьев. В 2023 году было обследовано 750 листьев на трех участках города. На рисунке 2 представлены схемы расположения участков, на которых были взяты образцы листьев для исследования 2024 года.



Рисунок 2 – Расположение объектов исследований, а) – в Центральном районе; б) – в жилых районах Падун и Энергетик; в) – в жилом районе Гидростроитель; г) – контроль – г. Вихоревка

Figure 2 – Location of the research objects: a) in the Central District; b) in the residential areas of Padun and Energetik; c) in the residential area of Gidrostroitel; d) control – Vihorevka

Источник: собственное изображение авторов
Source: the author's own image

Объекты исследования расположены на значительном расстоянии друг от друга. Так расстояние от центрального района до жилых районов Падун и Энергетик по прямой составляет 16 км, до жилого района Гидростроитель по прямой 22 км, до г. Вихоревка (контроль) по прямой 27 км. Контрольные точки были выбраны по уровню загрязнения воздуха и расстоянию от источников промышленного загрязнения, поскольку практически все насаждения тополя бальзамического были ослаблены ЛРТ и бурой пятнистостью.

В 2023 году в городах Иркутской области разразилась эпифитотия ржавчины тополя

(возбудитель - гриб *Melampsora larici-populina*), ранее здесь не встречавшейся. Инфекция, началась с поросли, затем перешла на обрезанные деревья и к концу лета поразила до 98% тополей, вызвав преждевременное почернение и опадение листьев. Источником заражения стал занос спор из Сибири (Красноярск, Томск и др.). В 2024 году ситуация повторилась: к ржавчине добавилась бурая пятнистость (возбудитель — гриб *Marssonina populi* Sacc.) [21].

На рисунке 2 представлено состояние крон деревьев и листьев на момент сбора листьев.



а)



б)



в)



г)

д)

е)

Рисунок 3 – Состояние крон и листьев тополя бальзамического: а) – кроны неформованных деревьев, б) - кроны формованных деревьев, в) - кроны поросли; г) - листья неформованных деревьев, д) – листья формованных деревьев, е) – листья поросли.

Figure 3 – The condition of the crowns and leaves of the balsam poplar: а) the crowns of unformed trees, б) the crowns of formed trees, в) the crowns of sprouts; г) the leaves of unformed trees, д) the leaves of formed trees, and ф) the leaves of sprouts.

Источник: собственные изображения авторов

Source: author's images

Как видно на рисунке 3 (а-в), состояние крон в августе 2024, когда проводились исследования свидетельствует об ослаблении деревьев, хорошо заметны признаки дефолиации, листья имеют признаки поражения бурой пятнистостью и ржавчиной, при этом, средний процент поражения листовых пластин грибковыми заболеваниями составил более 50%. (г-е).

Все полученные результаты обработаны методами вариационной статистики в программе Excel 2013 с определением следующих показателей: среднего значения, ошибки среднего, среднеквадратического отклонения, коэффициента

вариации, точности полученных результатов, среднее значение по всем категориям деревьев определялось как среднее арифметическое. Также была проведена проверка нормальности распределения использованием критерия Колмогорова – Смирнова.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования в 2024 году листовых пластин тополя бальзамического показали, что площади листьев тополя бальзамического существенно отличаются друг от друга (таблица 2).

Таблица 2

Площади листовой пластинки тополя бальзамического (см²) в различных частях города

Table 2

Areas of the leaf plate of the balsam poplar (cm²) in different parts of the city

Категории деревьев Categories of trees	Место исследования/Place of research				
	Централ ьный район/ The Central district	Энерг етик/ The power engineer	Гидростро итель/ Hydraulic builder	Па дун/ Padun	Вихор евка (контроль)/ Vikhorevka (control)
Неформов анные деревья Unformatte d trees	29,9	27,5	31,6	25,7	36,6
Формован ные деревья Molded Trees	28,7	40,5	35,2	21,3	27,3
Поросль The growth	27,1	39,8	27,1	-	23,6

Среднее значение по трем категориям деревьев The average value for the three tree categories	28,6	35,9	31,3	23,5	29,2

Источник: собственные вычисления авторов
Source: author's calculation

Как показывают результаты, приведенные в таблице 2, наибольшая площадь листовой пластинки наблюдается в жилых районах Энергетик и Гидростроитель ($35,9 \text{ см}^2$ и $31,3 \text{ см}^2$), наименьшие площади зафиксированы в жилом районе Падун и в Центральном районе города, где сконцентрированы промышленные предприятия (соответственно $23,5 \text{ см}^2$ и $28,6 \text{ см}^2$). Если оценивать площадь листьев по

категориям деревьев, то закономерно у формованных деревьев и поросли площади больше, чем у неформованных.

Измеренные листья тополя бальзамического (рисунок 4) различаются по площади в зависимости от категории деревьев и места исследования.

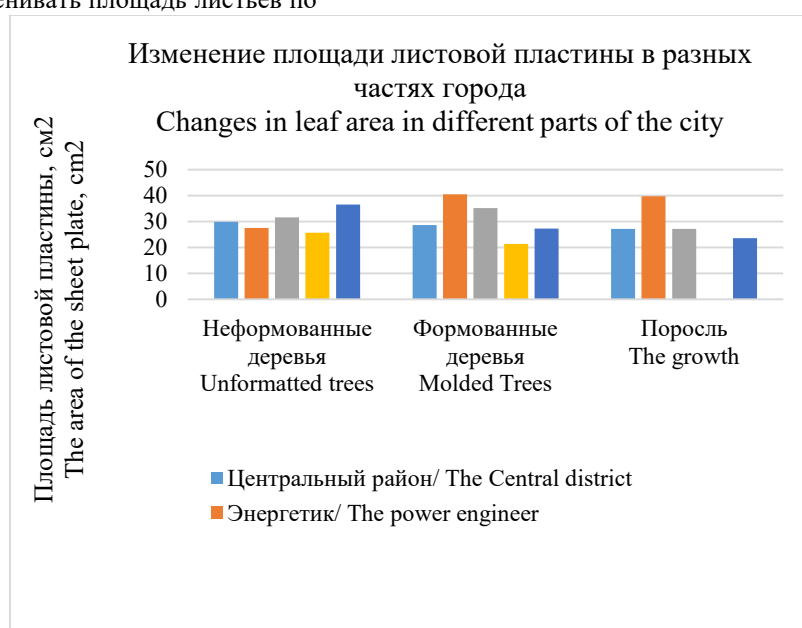


Рисунок 4 – Средняя площадь листовой пластины тополя бальзамического на территории города Братска
Figure 4 – Average leaf area of the balsam poplar in the city of Bratsk

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как видно из рисунка 3 площадь листовой пластинки существенно отличается от $27,5 \text{ см}^2$ до $40,5 \text{ см}^2$. При этом нет выраженной зависимости площади листовых пластинок по частям города и категориям деревьев. Так, например, в жилом районе Энергетик площадь листьев формованных деревьев и поросли существенно выше, чем у неформованных деревьев (на $32,1\%$ и $30,9\%$ соответственно). На контрольном участке, наоборот, площадь листьев на неформованных деревьях выше, чем у формованных на $25,4\%$ и на $35,5\%$ у поросли.

Асимметрия листовой пластины по площади согласно методике Е.В. Авдеевой, определяется как отношение площадей меньшей половины листа к большей, выраженное в процентах [18,19]. Асимметрия листовых пластин по площади для всей выборки определялась как среднее арифметическое значение.

В таблице 3 представлены показатели асимметричности листовых пластин тополя бальзамического согласно методике Е.В. Авдеевой по районам исследования, а также коэффициенты асимметрии левой и правой половинок листьев по площади (по методике Захарова).

Таблица 3

Процент асимметричности (числитель) и величина асимметрии листовых пластинок (знаменатель)

Table 3

Percentage of asymmetry (numerator) and the value of asymmetry of leaf blades (denominator)

Категории деревьев	Процент асимметричности, %/коэффициент асимметрии листовых пластинок по площади Percentage of asymmetry, %/coefficient of asymmetry of leaf blades by area				
	Центральный район/ The Central district	Энергетик/ The power engineer	Гидростроитель/ Hydraulic builder	Падун/ Padun	Вихоревка (контроль)/ Vikhorevka (control)
Неформованные деревья Unformatted trees	29/0,015	70/0,015	55/0,029	24/0,026	40/0,018
Формованные деревья Molded Trees	34/0,015	64/0,018	52/0,012	48/0,026	28/0,018
Поросль The growth	31/0,018	35/0,069	32/0,027	-	20/0,018
Среднее значение по трем категориям деревьев The average value for the three tree categories	31,3/0,016	56,3/0,034	46,3/0,023	36,0/0,026	29,3/0,018

Источник: собственные вычисления авторов
Source: author's calculation

Как видно из таблицы 3 процент асимметричности по методике Е.В. Авдеевой значительно отличается по частям города и категориям деревьев. Наибольший процент асимметричности площадей листовых пластинок отмечен в жилом районе Энергетик по всем категориям деревьев от неформованных до поросли (35% у поросли, 70% у неформованных деревьев. В ж. р. Падун у неформованных деревьев процент асимметричности составил 24%. По контролю процент асимметричности площади листовых пластинок формованных деревьев и поросли существенно меньше, чем в различных районах города и составил соответственно 28% и 20%.

Величина коэффициента асимметрии площадей листовых пластинок неформованных деревьев изменяется от 0,018 в Вихоревке (контроль) до 0,029 в Гидростроителе. В центральном районе и в Энергетике показатель асимметрии равен 0,015.

Средний процент асимметричности площадей листовых пластинок неформованных деревьев тополя бальзамического в центральном районе города Братска составила 29,0 %, формованных деревьев – 34,0%, поросли – 31,0%. Величина асимметрии площадей половинок листа изменяется от 0,015 до 0,069. В центральном районе и в Вихоревке показатель асимметрии равен 0,018.

Таблица 4

Оценка качества среды и стабильности развития по площадям половинок листовых пластин тополя бальзамического

Table 4

Assessment of the quality of the environment and the stability of development by the areas of the halves of the leaf plates of the poplar balsam

Места сбора листьев Gathering places list-ev	Среднее значение показателя асимметричности по всем категориям деревьев % Average value of the asymmetry index for all tree categories %	Оценка качества среды по методике Е.В. Авдеевой Environmental quality assessment according to E.V. Avdeeva's methodology
Падун/ Padun	36,0	Критическое состояние

		Critical condition
Энергетик/ The power engineer	56,3	Критическое состояние Critical condition
Центральный район/ The Central district	31,3	Критическое состояние Critical condition
Гидростроитель/ Hydraulic builder	46,3	Критическое состояние Critical condition
Вихоревка/ Vikhorevka	29,3	Критическое состояние Critical condition

Источник: собственные вычисления авторов
Source: author's calculation

Как видно из таблицы 4, оценка качества среды по методике Е.В. Авдеевой свидетельствует о критическом состоянии среды или самих деревьев. Следующим этапом явилось определение стабильности развития листовых пластинок по методике В.М. Захарова [9,10].

На рисунках 5-7 представлены гистограммы значений ФА для различных категорий деревьев и районов города в сравнении с показателем критического показателя качества среды ФА >0,054.

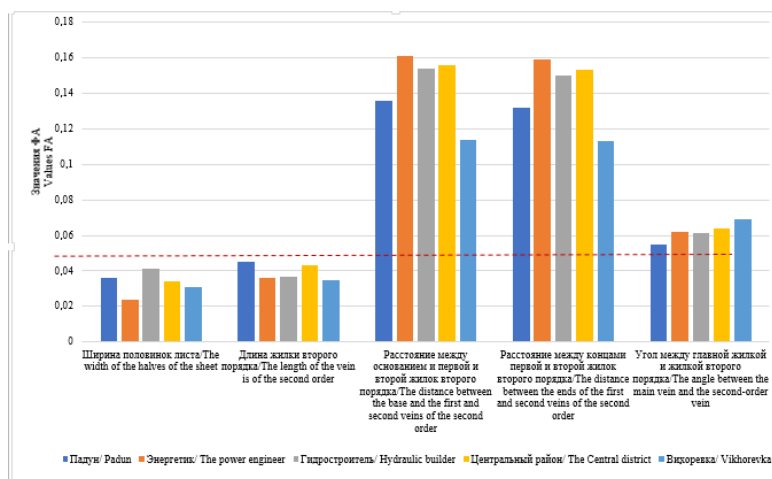


Рисунок 5 – Показатели стабильности развития неформованных деревьев тополя balsamic по пяти билатеральным признакам в различных районах исследований.

Figure 5 – Indicators of the stability of the development of unformed balsam poplar trees according to five bilateral features in various research areas.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

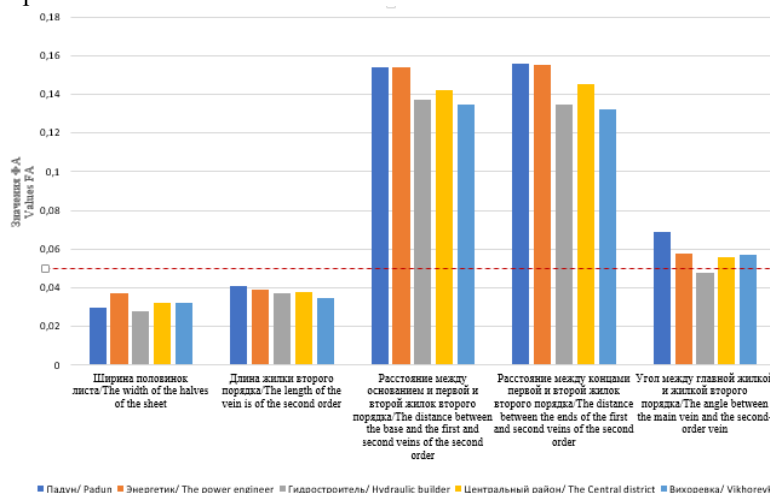


Рисунок 6 – Показатели стабильности развития формованных деревьев тополя бальзамического по пяти билатеральным признакам в различных районах исследований
Figure 6 – Indicators of the stability of the development of shaped balsam poplar trees according to five bilateral characteristics in various research areas

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

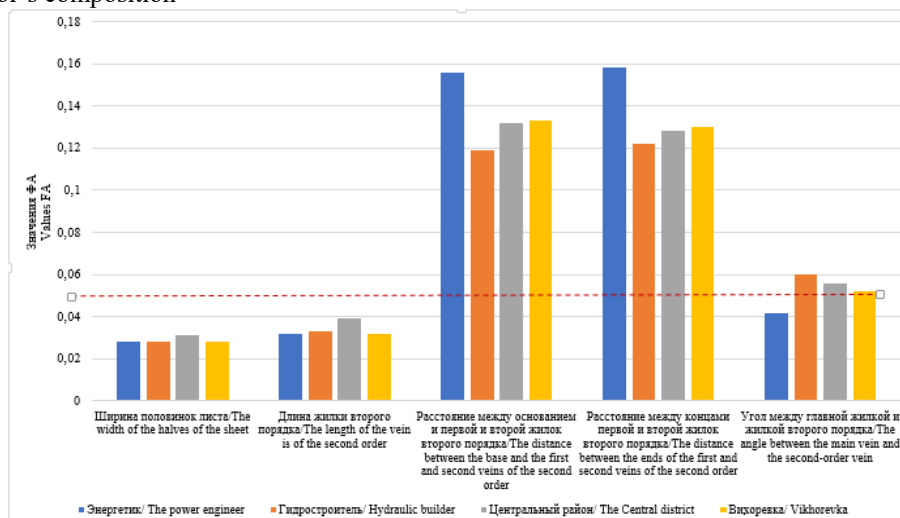


Рисунок 7 – Показатели стабильности развития поросли деревьев тополя бальзамического по пяти билатеральным признакам в различных районах исследований
Figure 7 – Indicators of the stability of the development of poplar trees in five bilateral features in various research areas

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как видно из рисунков 5-7 различные показатели дают существенно отличимые значения флуктуирующей асимметрии. Во всех районах исследования наименьшие значения ФА у ширины левой и правой половины листа и длины жилок второго порядка. Величина ФА по этим показателям находятся в диапазоне от 0,023 до 0,048. По данным признакам показатель стабильности развития находится в диапазоне условно-нормальное и начальное (с незначительным отклонением от нормы качества среды). Показатели флуктуирующей асимметрии по расстоянию между основанием первой и второй жилок второго порядка и концами первой и второй жилок второго порядка,

а также по углу между главной жилкой и жилкой второго порядка выше критического значения 0,054 (обозначено на гистограммах красной горизонтальной пунктирной линией). При этом расстояние между основанием и концами первой и второй жилки второго порядка слева и справа сильно отличаются друг от друга и имеют значения ФА практически в два раза превышающие критическое состояние 0,054. При этом, показатели ФА по пяти билатеральным признакам мало зависят от категории деревьев и степени удаленности от источников загрязнения. В таблице 5 приведены средние значения показателя стабильности развития тополя бальзамического.

Таблица 5

Стабильность развития листовых пластин тополя бальзамического на территории г. Братска

Table 5

Stability of the balsam poplar leaf plate development in the territory of Bratsk

Объекты исследования Objects of research	Интегральный показатель стабильности развития Integral indicator of development stability	Баллы Scores	Качество среды The quality of the environment
<i>Неформованные деревья / Unformed trees</i>			
Центральный район The Central district	0,074	5	Критическое состояние Critical condition

Естественные науки и лес

Энергетик The power engineer	0,071	5	Критическое состояние Critical condition
Гидростроитель Hydraulic builder	0,073	5	Критическое состояние Critical condition
Падун Padun	0,068	5	Критическое состояние Critical condition
Вихоревка Vikhorevka	0,062	5	Критическое состояние Critical condition
<i>Формованные деревья/ Molded Trees</i>			
Центральный район The Central district	0,067	5	Критическое состояние Critical condition
Энергетик The power engineer	0,072	5	Критическое состояние Critical condition
Гидростроитель Hydraulic builder	0,063	5	Критическое состояние Critical condition
Падун Padun	0,074	5	Критическое состояние Critical condition
Вихоревка Vikhorevka	0,065	5	Критическое состояние Critical condition
<i>Поросль/ The growth</i>			
Центральный район The Central district	0,064	5	Критическое состояние Critical condition
Энергетик The power engineer	0,065	5	Критическое состояние Critical condition
Гидростроитель Hydraulic builder	0,060	5	Критическое состояние Critical condition
Вихоревка Vikhorevka	0,061	5	Критическое состояние Critical condition

Источник: собственные вычисления авторов
Source: author's calculation

Как показывают результаты исследований, все категории деревьев по различным районам города отнесены к пятому баллу по шкале оценки

качества среды, что означает критическое состояние. В таблице 6 приведены статистические показатели проведенных измерений.

Таблица 6

Статистические показатели интегрального показателя стабильности тополя бальзамического по разным категориям деревьев в разных участках Братска

Table 6

Statistical indicators of the integral indicator of the balsam poplar stability in different categories of trees in different areas of Bratsk

Объект исследования The object of research	Среднее значение/ Average value, $\bar{X} \pm m$	Стандартное отклонение/ Standard deviation, σ	Коэффициент Вариации/ Coefficient of variation, CV%	Точность/ Accuracy, P%

Естественные науки и лес

<i>Неформованные деревья/ Unformed trees</i>					
район	Центральный	0,074±0,	0,026	36,30	5,74
	The Central	006			
district					
Энергетик	0,071±0,	0,007	9,86	1,79	
The power	001				
engineer					
Гидростроите	0,073±0,	0,023	31,51	5,72	
ль	004				
Hydraulic					
builder					
Падун	0,068±0,	0,033	48,53	8,47	
Padun	007				
Вихоревка	0,062±0,	0,016	26,36	4,17	
Vikhorevka	003				
<i>Формованные деревья/ Molded Trees</i>					
район	Центральный	0,067±0,	0,019	28,36	5,51
	The Central	004			
district					
Энергетик	0,072±0,	0,026	36,11	7,36	
The power	006				
engineer					
Гидростроите	0,063±0,	0,017	26,98	3,84	
ль	003				
Hydraulic					
builder					
Падун	0,074±0,	0,023	31,08	7,48	
Padun	007				
Вихоревка	0,065±0,	0,021	32,31	5,96	
Vikhorevka	004				
<i>Поросль/ The growth</i>					
район	Центральный	0,064±0,	0,024	37,50	7,30
	The Central	004			
district					
Энергетик	0,065±0,	0,016	24,62	4,17	
The power	003				
engineer					
Гидростроите	0,060±0,	0,025	41,67	7,68	
ль	005				
Hydraulic					
builder					
Вихоревка	0,061±0,	0,014	22,95	3,62	
Vikhorevka	002				

Источник: собственные вычисления авторов
Source: author's calculation

Как показывают данные статистической обработки полученных результатов исследований, коэффициент вариации колеблется от 9,86 до 48,53, точно также точность колеблется от 1,79 до 8,47 %. Причиной высокой вариации данный показатель можно объяснить тем, что степень ослабления деревьев в местах взятия проб отличались друг от друга. Полученные результаты были проверены по

критерию Колмогорова – Смирнова на соответствие нормальному распределению (таблица 7).

Полученные результаты исследований сопоставлены с данными 2023 года, когда в Иркутской области была впервые зафиксировано массовое поражение тополя бальзамического листовой ржавчиной тополя (таблица 7), которое

начало проявляться в июле месяце. Исследования проводились в Центральном районе г. Братска, ж. р. Энергетик, а также в качестве контроля взяты листья

в поселке Порожский, находящийся на расстоянии 27 км от центральной части города (контроль).

Таблица 7

Результаты проверки на соответствие нормальному распределению

Table 7

Results of the normal distribution test						
№ набл.	Среднее арифметическое	Дисперсия	Среднее квадратич. отклонение	Коэффициент вариации, %	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Неформованные деревья						
320	0,074338	0,002367	0,048656	65,45166	2,215146	6,985595
Формованные деревья						
320	0,056230	0,001938	0,044019	78,28428	0,793041	0,149105
Поросль						
320	0,056041	0,001996	0,044677	79,72196	0,949662	0,731513

Как показывают результаты проверки, коэффициент асимметрии у различных категорий деревьев имеет положительную асимметрию, то есть данные имеют тенденцию к более высокому значению, при этом, наивысший коэффициент асимметрии проявляют измерения, полученные с неформованных деревьев. Коэффициент эксцесса, который показывает отклонение вершины вверх или вниз имеют положительные значения. Так как значения этого показателя выше 0, то мы имеем дело с высоко вершинным эксцессом распределения. Критерий Колмогорова – Смирнова подтверждает

гипотезу нормального распределения, так как критерий нормального распределения Колмогорова-Смирнова составляет d от 0,10 до 0,14, $p > 0,2$. Если D статистика Колмогорова-Смирнова значима ($p < 0,05$), то гипотеза о том, что соответствующее распределение нормально, должна быть отвергнута. Для исследованных результатов $p > 0,2$, поэтому гипотеза о нормальности распределения принимается. Полученные результаты проверки на нормальность распределения требуют дополнительных исследований причин соответствия нормальному распределению.

Таблица 8

Результаты оценки стабильности развития тополя бальзамического в 2023 году

Table 8

Results of the assessment of the stability of the development of the balsam poplar in 2023

Район District	Категория деревьев Tree category	Интегральный показатель стабильности развития Integral indicator of development stability	Баллы Scores	Качество среды The quality of the environment
Порожский Porozhsky	Неформованные деревья/ Unformed trees	0,027	1	Условно-нормальное Conditionally normal
	Формованные деревья/ Molded Trees	0,030	1	Условно-нормальное Conditionally normal
	Поросль/ The growth	0,027	1	Условно-нормальное Conditionally normal
Энергетик The power engineer	Неформованные деревья/ Unformed trees	0,036	1	Условно-нормальное Conditionally normal
	Формованные деревья/ Molded Trees	0,041	2	Начальное (незначительное) отклонение от нормы Initial (minor) deviation from the norm

Центральный Central	Поросль/ The growth	0,021	1	Условно-нормальное Conditionally normal
	Неформованные деревья/ Unformed trees	0,043	2	Начальное (незначительное) отклонение от нормы Initial (minor) deviation from the norm
	Формованные деревья/ Molded Trees	0,046	3	Средний уровень отклонения от нормы The average level of deviation from the norm
	Поросль/ The growth	0,022	1	Условно-нормальное Conditionally normal

Источник: собственные вычисления авторов
Source: author's calculation

Как видно из таблицы 8 величина ФА в 2023 году была значительно ниже, чем в 2024 году как по категориям деревьев, так и по районам города.

На рисунке 8 показана гистограмма величины ФА в 2023 году.

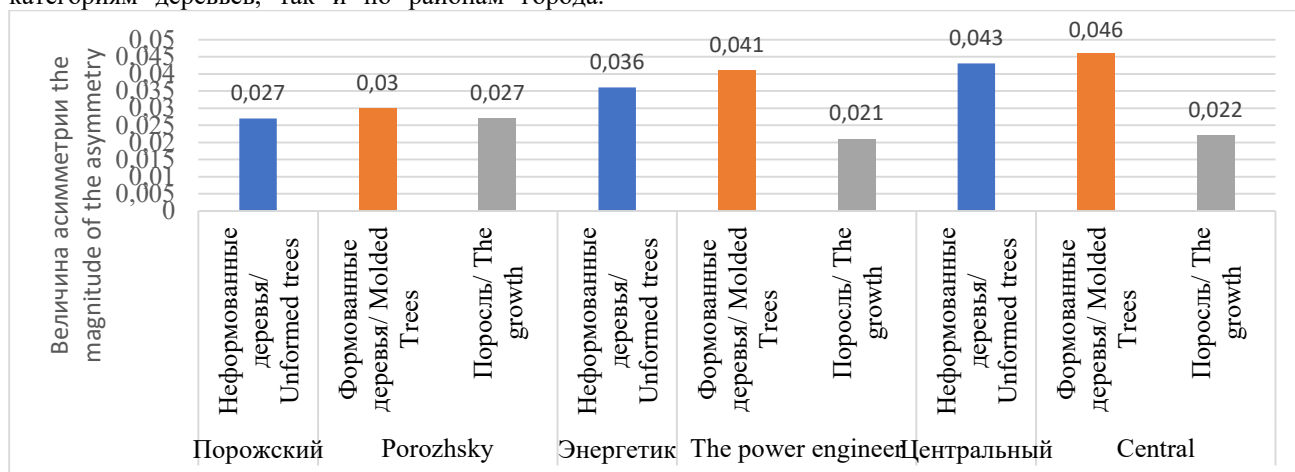


Рисунок 8 – Величины ФА в 2023 году

Figure 8 – FA values in 2023

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как можно видеть из таблицы 8, в 2023 году район Порожский (контроль) оказался наиболее благоприятным по качеству среды. Все категории деревьев отнесены по стабильности развития к 1 баллу, что означает условно нормальное качество среды. В Энергетике показатель стабильности растений у формованных деревьев оценен баллом 2, а в центральном районе, где находятся основные промышленные предприятия неформованные и формованные деревья оцениваются соответственно 2 и 3 баллом. Это означает, что за год общее состояние деревьев тополя бальзамического резко ухудшилось и в конце вегетационного периода 2024 году снизилось до критического состояния

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Массовое поражение тополя бальзамического листовой ржавчиной (возбудитель *Melampsora larici-populina* Kleb.) и бурой пятнистостью (возбудитель *Marssonina populi* Sacc.) привело резкому ухудшению показателей стабильности развития деревьев.

2. В период с 2023-2024 годов к концу вегетационного периода, когда проводится исследование флуктуирующей асимметрии, наблюдается сильная дефолиация деревьев и

поражение листьев ржавчиной и бурой пятнистостью.

3. Площади половинок листа являются дополнительным критерием оценки стабильности развития и также свидетельствуют о критическом состоянии среды.

4. Исследования ФА билатеральных признаков листовых пластинок по 5 показателям (по методике В.М. Захарова) показали, что в 2024 году как формованные, неформованные деревья, так и поросль тополя бальзамического находятся в критическом состоянии вне зависимости от удаления от источников загрязнения. В 2023 году состояние стабильности развития колебалось от условно – нормального до среднего уровня отклонения от нормы.

5. Очевидно, что одним из факторов, оказывающих влияние на стабильность развития городских насаждений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), является фактор ослабления жизненного состояния деревьев под воздействием листовой ржавчины тополя и бурой пятнистости листьев, что приводит к потере декоративности растений, ранней дефолиации и потере симметрии в листовых пластинках.

Список литературы

1. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. – Новосибирск: Гео, 2012. – 707 с.
2. Runova E., Verkhoturov V., Anoshkina L. Assessment of the Condition of Balsam Poplar Trees (*Populus balsamifera* L.) in a Residential Area of Bratsk. *Acta silvae et Ligni*. 2021; 126:53–60.
3. Синчук Н.В., Курченко В.П. Устойчивость различных видов тополей (*Populus* spp.) к заболеваниям и комплексу вредителей // *Экобиотех.* – 2021. – Т. 4. – № 3. – С. 210–220.
4. Рунова Е.М., Новоселова О.И. Оценка состояния тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях Братска по результатам инвентаризации // *Актуальные проблемы лесного комплекса.* – 2023. – № 63. – С. 236–240.
5. Латышева И.В., Лощенко К.А., Вологжина С.Ж. Климат и экология Иркутской области: учебное пособие. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2024. – 229 с.
6. Рунова Е.М., Новоселова О.И. Эпифитотийное развитие листовой ржавчины тополя бальзамического в городах Иркутской области // *J. of Agriculture and Environment.* – 2023. – № 12 (40). – DOI: 10.23649/JAE.2023.40.4
7. Сурина Т.А., Копина М.Б., Смирнова А.В. Ржавчина тополя, вызываемая грибами рода *Melampsora* // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике: Материалы Третьей Всерос. конф. с междунар. участием. Москва, 11–15 апреля 2022 г. – М.; Красноярск: Изд-во ИЛ СО РАН, 2022. – С. 134–136.
8. Поликсенова В.Д., Храмцов А.К., Гирилович И.С. и др. Фитопатогенные микромицеты на чужеродных растениях из издания «Черная книга флоры Беларуси: чужеродные вредоносные растения» // *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* – 2021. – № 3. – С. 78–87.
9. Захаров В.М., Шадрин Е.Г., Турмухаметова Е.Г. и др. Оценка состояния растений по стабильности развития в естественных и антропогенных условиях (флуктуирующая асимметрия признаков листа березы повислой *Betula pendula* L.) // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая.* – 2020. – № 2. – С. 191–196. – DOI: 10.31857/S0002332920020113
10. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая.* – 2020. – № 2. – С. 115–123. – DOI: 10.31857/S0002332920020125

11. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). Распоряжение Росэкологии от 16.10.2003 № 660. – М.: Наука, 2003. – 24 с.
12. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Populus balsamifera* L., участвующего в озеленении г. Иркутска // Вестник ИрГСХА. – 2021. – Вып. 3 (104). – С. 75–88. – DOI: 10.51215/1999-3765-2021-104-93-106
13. Лебединский И.А., Мочалова К.Ю. Площадь листовой пластинки как дополнительный критерий оценки выраженности флуктуирующей асимметрии по методике Захарова // Вестник ПГГПУ. Серия № 2. Физико-математические и естественные науки. – 2020. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ploschad-listovoy-plastinki-kak-dopolnitelnyy-kriteriy-otsenki-vyrazhennosti-fluktuiruyushey-asimmetrii-po-metodike-zaharova> (дата обращения: 02.03.2026)
14. Коротченко И.С., Лебедев Н.А., Первышина Г.Г., Кондратюк Т.А., Медведева В.А. Влияние выбросов тепловых электростанций Красноярского края на стабильность развития тополя бальзамического // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 10. – С. 85–90.
15. Erofeeva E.A., Yakimov B.N. Change of Leaf Trait Asymmetry Type in *Tilia cordata* Mill. and *Betula pendula* Roth under Air Pollution. *Symmetry*. 2020; 12(5):727. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/727> (дата обращения: 20.09.2020)
16. Yu Z., Shen K., Newcombe G. et al. Leaf Cuticle Can Contribute to Non-Host Resistance to Poplar Leaf Rust. *Forests*. 2019; 10(10):870. – DOI: 10.3390/f10100870
17. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Особенности биомониторинга урбанизированных территорий с использованием флуктуирующей асимметрии разных видов древесных растений (на примере Иркутска) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-biomonitringa-urbanizirovannyh-territoriy-s-ispolzovaniem-fluktuiruyushey-asimmetrii-raznyh-vidov-drevesnyh-rasteniy> (дата обращения: 16.04.2026)
18. Черникова К.В., Авдеева Е.В. Оценка качества атмосферного воздуха методом биоиндикации по состоянию ассимиляционного аппарата тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. – 2022. – Т. 25. – С. 116–119.
19. Кухар И.В., Авдеева Е.В., Иванов Д.В., Черникова К.В. Дендроиндикация древесных растений в урбанизированной среде // Проблемы озеленения крупных городов: сборник статей XXII научно-практического форума. Москва, 29–30 августа 2023 года. – М.: МК-ИНТЕРТРЕЙД, ИНТЕК, 2023. – С. 109–112.
20. Шадрин Е.Г., Солдатов В.Ю. Оценка здоровья среды по величине флуктуирующей асимметрии древесных растений: анализ возможных причин искажения результатов // Известия РАН. Серия биологическая. – 2023. – № 7-suppl. – С. 29–38. – DOI: 10.31857/S1026347023600243
21. Рунова Е.М., Гарус И.А. Состояние тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) и тополя белого (*Populus alba* L.) в урбоэкосистемах Иркутской области // Лесной вестник / *Forestry Bulletin*. – 2025. – Т. 29. – № 5. – С. 149–163. – DOI: 10.18698/2542-1468-2025-5-149-163

References

1. Koropachinsky I.Yu., Vstovskaya T.N. *Drevesnye rasteniya Aziatskoy Rossii*. [Woody Plants of Asian Russia]. Novosibirsk: Geo, 2012. 707 p. (In Russ.)
2. Runova E., Verkhoturov V., Anoshkina L. Assessment of the Condition of Balsam Poplar Trees (*Populus balsamifera* L.) in a Residential Area of Bratsk. *Acta silvae et Ligni*. 2021; 126:53-60.
3. Sinchuk N.V., Kurchenko V.P. Ustoychivost razlichnykh vidov topoley (*Populus* spp.) k zabolevaniyam i kompleksu vrediteley. [Resistance of Various Species of Poplars (*Populus* spp.) to Diseases and a Complex of Pests]. *Ekobiotech = Ecobiotech*. 2021; Vol. 4(3):210-220. (In Russ.)
4. Runova E.M., Novoselova O.I. Otsenka sostoyaniya topolya balzamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) v usloviyakh Bratska po rezultatam inventarizatsii. [Assessment of the Condition of Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.) in Bratsk Based on Inventory Results]. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa = Actual Problems of the Forest Complex*. 2023; 63:236-240. (In Russ.)
5. Latysheva I.V., Loshchenko K.A., Vologzhina S.Zh. *Klimat i ekologiya Irkutskoy oblasti: uchebnoe posobie*. [Climate and Ecology of the Irkutsk Region: Textbook]. Irkutsk: IGU Publ., 2024. 229 p. (In Russ.)
6. Runova E.M., Novoselova O.I. Epifitoticheskoye razvitiye listovoy rzhavchiny topolya balzamicheskogo v gorodakh Irkutskoy oblasti. [Epiphytotic Development of Balsam Poplar Leaf Rust in the Cities of the Irkutsk Region]. *J. of Agriculture and Environment*. 2023; 12(40). DOI: 10.23649/JAE.2023.40.4 (In Russ.)
7. Surina T.A., Kopina M.B., Smirnova A.V. Rzhavchina topolya, vyzyvaemaya gribami roda *Melampsora*. [Poplar Rust Caused by Fungi of the Genus *Melampsora*]. In: *Monitoring i biologicheskie metody kontrolya vrediteley*

- i patogenov drevesnykh rasteniy: ot teorii k praktike. Materialy Tretyey Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem. Moscow, 2022. Moscow; Krasnoyarsk: IL SB RAS Publ., 2022. pp. 134-136. (In Russ.)
8. Poliksenova V.D., Khramtsov A.K., Girilovich I.S. et al. Fitopatogennye mikromitsety na chuzherodnykh rasteniyakh iz izdaniya «Chernaya kniga flory Belarusi: chuzherodnye vredonosnye rasteniya». [Phytopathological Micromycetes on Alien Plants from the Publication “The Black Book of the Flora of Belarus: Alien Harmful Plants”]. Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Journal of the Belarusian State University. Biology. 2021; 3:78-87. (In Russ.)
 9. Zakharov V.M., Shadrina E.G., Turmukhametova E.G. et al. Otsenka sostoyaniya rasteniy po stabilnosti razvitiya v estestvennykh i antropogennykh usloviyakh (fluktuiruyushchaya asimmetriya priznakov lista berezy povisloy *Betula pendula* L.). [Assessment of Plant Condition by Developmental Stability in Natural and Anthropogenic Environments (Fluctuating Asymmetry of Leaf Traits in Silver Birch *Betula pendula* L.)]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series. 2020; 2:191-196. DOI: 10.31857/S0002332920020113 (In Russ.)
 10. Zakharov V.M., Trofimov I.E. Otsenka sostoyaniya bioraznoobraziya: issledovanie stabilnosti razvitiya. [Assessment of Biodiversity State: A Study of Developmental Stability]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series. 2020; 2:115-123. DOI: 10.31857/S0002332920020125 (In Russ.)
 11. Metodicheskie rekomendatsii po vypolneniyu otsenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivyykh sushchestv (otsenka stabilnosti razvitiya zhivyykh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur). [Methodological Recommendations for Assessing Environmental Quality by the State of Living Organisms (Assessment of Developmental Stability of Living Organisms by the Level of Asymmetry of Morphological Structures)]. Order of Rasecology No. 660 dated 16.10.2003. Moscow: Nauka, 2003. 24 p. (In Russ.)
 12. Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Pokazateli stabilnosti razvitiya *Populus balsamifera* L., uchastvuyushchego v ozelenenii g. Irkutsk. [Indicators of Developmental Stability of *Populus balsamifera* L. Participating in the Greening of Irkutsk]. Vestnik IrGSKHA = Bulletin of Irkutsk State Agricultural Academy. 2021; 3(104):75-88. DOI: 10.51215/1999-3765-2021-104-93-106 (In Russ.)
 13. Lebedinsky I.A., Mochalova K.Yu. Ploshchad listovoy plastinki kak dopolnitelnyy kriteriy otsenki vyrazhennosti fluktuiruyushchey asimmetrii po metodike Zakharova. [Leaf Blade Area as an Additional Criterion for Assessing the Severity of Fluctuating Asymmetry According to the Zakharov Method]. Vestnik PGGPU. Seriya No. 2. Fiziko-matematicheskie i estestvennye nauki = Bulletin of Perm State Humanitarian Pedagogical University. Series No. 2. Physical, Mathematical and Natural Sciences. 2020; 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ploshchad-listovoy-plastinki-kak-dopolnitelnyy-kriteriy-otsenki-vyrazhennosti-fluktuiruyushchey-asimmetrii-po-metodike-zaharova> (accessed: 02.03.2026) (In Russ.)
 14. Korotchenko I.S., Lebedev N.A., Pervyshina G.G., Kondratyuk T.A., Medvedeva V.A. Vliyanie vybrosov teplovykh elektrostantsiy Krasnoyarskogo kraya na stabilnost razvitiya topolya balzamicheskogo. [Influence of Emissions from Thermal Power Plants of the Krasnoyarsk Region on the Developmental Stability of Balsam Poplar]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Modern Natural Science. 2020; 10:85-90. (In Russ.)
 15. Erofeeva E.A., Yakimov B.N. Change of Leaf Trait Asymmetry Type in *Tilia cordata* Mill. and *Betula pendula* Roth under Air Pollution. Symmetry. 2020; 12(5):727. URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/727> (accessed: 20.09.2020)
 16. Yu Z., Shen K., Newcombe G. et al. Leaf Cuticle Can Contribute to Non-Host Resistance to Poplar Leaf Rust. Forests. 2019; 10(10):870. DOI: 10.3390/f10100870
 17. Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Osobennosti biomonitoringa urbanizirovannykh territoriy s ispolzovaniem fluktuiruyushchey asimmetrii raznykh vidov drevesnykh rasteniy (na primere Irkutsk). [Features of Biomonitoring of Urbanized Territories Using Fluctuating Asymmetry of Different Woody Plant Species (Case Study of Irkutsk)]. Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki = Natural Resources of the Arctic and Subarctic. 2025; 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-biomonitoringa-urbanizirovannyh-territoriy-s-ispolzovaniem-fluktuiruyushchey-asimmetrii-raznyh-vidov-drevesnyh-rasteniy> (accessed: 16.04.2026) (In Russ.)
 18. Chernikova K.V., Avdeeva E.V. Otsenka kachestva atmosfernogo vozdukha metodom bioindikatsii po sostoyaniyu assimilyatsionnogo apparata topolya balzamicheskogo (*Populus balsamifera* L.). [Assessment of Atmospheric Air Quality by Bioindication Method According to the State of the Assimilation Apparatus of Balsam Poplar]. Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy = Fruit Growing, Seed Production, Introduction of Woody Plants. 2022; 25:116-119. (In Russ.)
 19. Kukhar I.V., Avdeeva E.V., Ivanov D.V., Chernikova K.V. Dendroindikatsiya drevesnykh rasteniy v urbanizirovannoy srede. [Dendroindication of Woody Plants in an Urban Environment]. In: Problemy

- ozeleneniya krupnykh gorodov: sbornik statey XXII nauchno-prakticheskogo foruma. Moscow, 2023. Moscow: MK-INTERTRADE, INTEK, 2023. pp. 109-112. (In Russ.)
20. Shadrina E.G., Soldatova V.Yu. Otsenka zdorovya sredy po velichine fluktuiruyushchey asimmetrii drevesnykh rasteniy: analiz vozmozhnykh prichin iskazheniya rezultatov. [Assessment of Environmental Health Based on the Fluctuating Asymmetry of Woody Plants: Analysis of Possible Causes of Distortion of Results]. Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series. 2023; 7-suppl:29-38. DOI: 10.31857/S1026347023600243 (In Russ.)
21. Runova E.M., Garus I.A. Sostoyanie topolya balzamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) i topolya belogo (*Populus alba* L.) v urbanizirovannykh ekosistemakh Irkutskoy oblasti. [The State of Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.) and White Poplar (*Populus alba* L.) in the Urban Ecosystems of the Irkutsk Region]. Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin. 2025; 29(5):149-163. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-5-149-163 (In Russ.)

Сведения об авторах

Рунова Елена Михайловна – доктор с.-х. наук, профессор, профессор базовой кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, ул. Макаренко, 40, 665709, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>, e-mail: runova0710@mail.ru.

Пузанова Ольга Анатольевна – кандидат с.-х. наук, доцент базовой кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, ул. Макаренко, 40, 665709, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9681-5041>, e-mail: puzanova-olga@rambler.ru.

Новоселова Ольга Ивановна – аспирант доцент базовой кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, ул. Макаренко, 40, 665709, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0913-2865>, e-mail: novoselova.o.i@mail.ru.

Information about the authors

Elena M. Runova – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Basic Department of Reproduction and Processing of Forest Resources, Bratsk State University, 40 Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>, e-mail: runova0710@mail.ru.

Olga A. Puzanova – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Reproduction and Processing of Forest Resources, Bratsk State University, 40 Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9681-5041>, e-mail: puzanova-olga@rambler.ru.

Olga I. Novoselova – is a postgraduate student and an associate professor at the Department of Reproduction and Processing of Forest Resources at Bratsk State University, 40 Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0913-2865>, e-mail: novoselova.o.i@mail.ru.

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/8>

УДК 630*17:630*228.7

Биоразнообразие дендрофлоры на объектах озеленения ограниченного пользования

Светлана Р. Страздаускене¹, svsun@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5229-1004>

Наталья Р. Сунгурова¹, n.sungurova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Александра Г. Куприянова², landscape.kag@yandex.ru

Сергей С. Макаров³, s.makarov@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Марина Г. Шаренкова¹, m.sharenkova@narfu.ru

Ирина В. Лазарева¹, lazar0903@mail.ru

¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литера У, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, Российская Федерация

Объекты озеленения ограниченного пользования входят в систему озеленения города, поэтому им уделяется пристальное внимание. Зеленые насаждения на территории образовательных учреждений кроме экологической, эстетической, рекреационной функций, выполняют образовательную и воспитательную роль. Следовательно, необходимо, чтобы на территории одного учреждения дендрологический состав был биологически разнообразен. В связи с этим, целью исследований было определение биоразнообразия дендрофлоры на территории детских садов в г. Архангельске и соответствие его нормативно-правовым документам. В статье представлен таксономический состав и систематический анализ учтенной древесно-кустарниковой растительности на исследуемых объектах. Установлено, что количество учтенных видов характеризуется 22 таксонами деревьев и 28 – кустарников. Доля хвойных растений составляет всего 1,1% от всех учтенных экземпляров. Так, из деревьев наиболее распространенная ель обыкновенная встречается всего на территории 50% исследуемых объектов, сосна обыкновенная – 39%, лиственница сибирская – 28%, сосна кедровая сибирская – 17%, туя западная – 11%, сосна горная – 1%. Из хвойных кустарников учтен лишь можжевельник обыкновенный, который произрастает на территории одного детского сада. Отмечено, что нормативным данным в той или иной степени соответствует число представителей дендрофлоры на участках 11% исследуемых объектов. Количество деревьев на гектар площади отвечает нормам в 61% детских садов. Для оценки схожести таксономических составов исследуемых детских садов использовались коэффициенты таксономического сходства: коэффициент Жаккара, коэффициент Сьеренсена и коэффициент Брея-Кертиса. Наиболее полное сходство биологических систем изучаемых объектов прослеживается в матрице, рассчитанной с помощью коэффициента Брея-Кертиса. Установлено, что из 153 пар соотношений биоценозов в 14 случаях сходство видов составляет более 50%. Полученные результаты могут быть использованы при планировании системы озеленения строящихся объектов, а также при проведении реконструкции имеющихся образовательных учреждений для подбора и корректировки ассортимента флористического состава с целью наиболее полного использования в образовательном процессе.

Ключевые слова: дендрофлора, детский сад, озеленение, объекты ландшафтной архитектуры, деревья, кустарники

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Биоразнообразие дендрофлоры на объектах озеленения ограниченного пользования / С. Р. Страздаускене, Н. Р. Сунгурова, А. Г. Куприянова, С. С. Макаров, М. Г. Шаренкова, И. В. Лазарева // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 118–134. – Библиогр.: с. 131–134 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/8>.

Поступила 22.01.2026. Пересмотрена 22.04.2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

The biodiversity of dendroflora in limited-use landscaping facilities

Svetlana R. Strazdauskene¹, svsun@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5229-1004>

Natalia R. Sungurova¹, n.sungurova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Alexandra G. Kuprianova², landscape.kag@yandex.ru

Sergey S. Makarov³, s.makarov@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Marina G. Sharenkova¹, m.sharenkova@narfu.ru

Irina V. Lazareva¹, lazar0903@mail.ru

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

²St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 194021, Saint Petersburg, Institutsky Lane, 5, litera U, Russian Federation

³Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127550, Russian Federation

Abstract

Limited-use landscaping facilities are part of the city's landscaping system, so they receive close attention. Green spaces on the territory of educational institutions, in addition to ecological, aesthetic, and recreational functions, perform an educational and recreational functions. Therefore, it is necessary that the dendrological composition be biologically diverse on the territory of one institution. In this regard, the purpose of the research was to determine the biodiversity of dendroflora on the territory of kindergartens in Arkhangelsk and its compliance with regulatory documents. The article presents the taxonomic composition and systematic analysis of the recorded woody and shrubby vegetation at the studied sites. It is established that the number of registered species is characterized by 22 taxa of trees and 28 of shrubs. The proportion of coniferous plants is only 1.1% of all recorded specimens. Thus, of the trees, the most *Picea abies* (L.) H. Karst. is found in only 50% of the studied objects, *Pinus sylvestris* L. – 39%, *Larix sibirica* Ledeb. – 28%, *Pinus sibirica* Rupr. – 17%, *Thuja occidentalis* L. – 11%, *Pinus mugo* Turra. – 1%. Of the coniferous shrubs, only the common juniper, which grows on the territory of one kindergarten, is taken into account. It is noted that the number of dendroflora representatives on the sites of 11% of the studied objects corresponds to the regulatory data to one degree or another. The number of trees per hectare meets the standards in 61% of children's gardens. To assess the similarity of the taxonomic compositions of the kindergartens studied, taxonomic similarity coefficients were used: the Jaccard coefficient, the Sorensen coefficient, and the Bray-Curtis coefficient. The most complete similarity of the biological systems of the studied objects can be traced in the matrix calculated using the Bray-Curtis coefficient. It was found that out of 153 pairs of biocenosis ratios, in 14 cases the similarity of species is more than 50%. The results obtained can be used in planning the landscaping system of facilities under construction, as well as in carrying out the reconstruction of existing educational institutions for the selection and adjustment of the range of floral composition in order to make the most complete use in the educational process.

Keywords: *dendroflora, kindergarten, landscaping, objects of landscape architecture, trees, shrubs*

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Strazdauskene S. R., Sungurova N. R., Kuprianova A. G., Makarov S. S., Sharenkova M. G., Lazareva I. V. (2026) The biodiversity of dendroflora in limited-use landscaping facilities. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 118–134 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/8>.

Received 22.01.2026.

Revised 22.04.2026.

Accepted 15.05.2026.

Published online 26.06.2026

Введение

Озеленение объектов ландшафтной архитектуры является обязательным условием формирования комфортной городской среды. Зеленые насаждения выполняют ряд важных функций, таких как рекреационная,

микrokлиматическая, градостроительная, экологическая, образовательная и др. [1-4].

К озелененным территориям ограниченного пользования, согласно ГОСТ Р 71473-2024 Ландшафтная архитектура территорий городских и сельских поселений. Термины и определения, относятся озелененные территории медицинских,

образовательных организаций, организаций дополнительного образования, научных учреждений, промышленных предприятий, объектов спорта (спортивных комплексов) и физкультурно-оздоровительных, жилых зданий и объектов капитального строительства иного функционального назначения с нормируемыми значениями площади озеленения. При планировании системы озеленения территорий образовательных организаций, особая роль отводится дошкольным образовательным учреждениям.

Благоустраивая территорию детских учреждений, ландшафтные архитекторы решают несколько задач экологическую, эстетическую, умственную, нравственную и физического воспитания детей [5-8]. Красивая, ухоженная территория привлекает дошкольникам чувство прекрасного, любовь к природе и родному краю. Дети проводят на воздухе зимой 33% времени, весной и осенью – 49 %, летом – 90% [9-11]. Именно здесь педагоги занимаются воспитанием детей на фоне живой природы.

Озеленение территории детских образовательных учреждений регламентируются следующими документами: СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений, СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи».

В соответствии с действующими нормативными документами к озеленению территорий детских дошкольных учреждений предъявляются следующие требования:

- Площадь озеленения должна составлять не менее 50% от общей площади земельного участка учреждения.

- Не допускается использование растений, обладающих ядовитыми, колючими, аллергенными свойствами, а также видов, дающих плоды, которые могут представлять опасность для детей. Кроме того, запрещается высаживать растения, засоряющие территорию при цветении и плодоношении и, следовательно, привлекающие большое количество насекомых. К числу таких растений относятся, например: бирючина, боярышник, шиповник, барбарис, бузина красная, снежноягодник, жимолость татарская и т.п.

Для территории детского сада, особенно в условиях городской среды, участок часто становится первой площадкой для знакомства дошкольников с природными процессами и формирования у них начальных трудовых навыков, а также воспитания бережного отношения к окружающей среде [12].

Для того, чтобы грамотно подойти к решению вопроса озеленения территорий дошкольных

учреждений в условиях антропогенной среды, целесообразно в первую очередь оценить ассортимент, систематическую структуру зеленых насаждений, его соответствие нормативным документам.

Целью исследований было определение биоразнообразия дендрофлоры на территории детских садов в г. Архангельске и соответствие его нормативно-правовым документам.

Материалы и методы

В настоящее время в ведении департамента образования Администрации города Архангельска находится 59 дошкольных организаций, осуществляющих образовательную деятельность [сайт Администрации Архангельска]. Район исследований располагается на севере Европейской части РФ в арктической зоне. Для него характерна продолжительная многоснежная холодная зима, короткое прохладное, часто дождливое, лето. Вегетационный период длится в среднем 115-120 дней. Часто наблюдаются поздневесенние и раннеосенние заморозки, которые отрицательно сказываются на произрастающей древесно-кустарниковой растительности в период цветения, образования завязей и одревеснения побегов. Все это откладывает отпечаток на ассортименте местной флоры, используемой в целях озеленения объектов ландшафтной архитектуры.

С целью изучения видового состава дендрофлоры в случайном порядке выбраны детские сады (объекты исследования), располагаемые во всех территориальных округах в границах МО Архангельск (рис. 1). В границах города выделено 9 территориальных округов. Наибольшее количество объектов исследования сосредоточено в центральных округах, где сконцентрировано наибольшее число проживающего населения (Ломоносовский и Октябрьский). При обследовании детских садов использованы общепринятые методики для проведения инвентаризационных работ на объектах ландшафтной архитектуры. При этом проводили сплошной пересчет всех произрастающих на территории каждого образовательного учреждения деревьев и кустарников (предмет исследования). Определяли их систематическую принадлежность. Латинские названия видов и фамилии авторов сверялись с онлайн атласом и определителем растений Плантариум (<https://www.plantarium.ru/>). Исследования проводились в летний период 2024 и 2025 гг.

Для оценки видового разнообразия и богатства объектов озеленения применяют безразмерные индексы, описываемые различными учеными [13-16, 21]. Мерой богатства биоценоза служит количество видов, обитающих в нем. С

Лесотехнический журнал 2/2026

точки зрения определения богатства биоценоза очевидно, что чем больше видов выявлено, тем оно выше. Под выравненностью понимается равномерность распределения видов по территории.

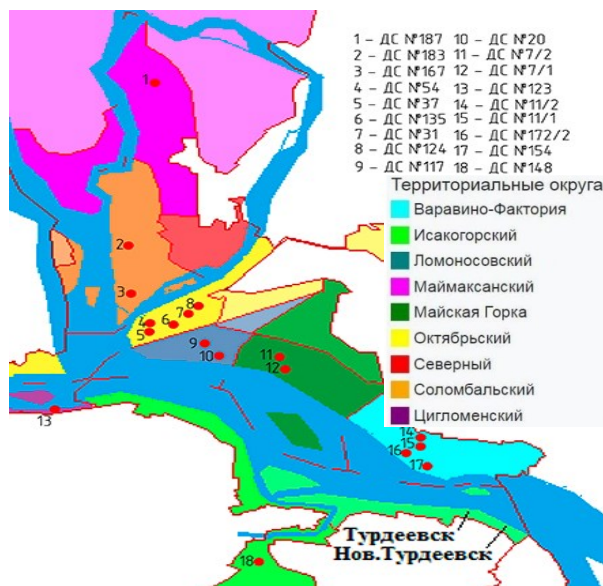


Рисунок 1. Схема расположения объектов исследования по территориальным округам города
 Figure 1. Layout of research facilities by territorial districts of the city

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для оценки схожести таксономических составов исследуемых объектов (детских садов) нами использовались коэффициенты таксономического сходства [17]: коэффициент Жаккара, коэффициент Сьеренсена и коэффициент Брея-Кертиса.

Коэффициент Жаккара (K_j) вычисляли по формуле 1:

$$K_j = \frac{c}{a+b-c}, \quad 1$$

где a – количество учтенных видов на территории одного детского сада;

b – количество видов на территории второго детского сада;

c – количество видов общих для первого и второго детских садов.

Коэффициент Серенсена (K_s) рассчитывали по формуле 2:

$$K_s = \frac{2c}{a+b}, \quad 2$$

где a – количество учтенных видов на территории одного детского сада;

b – количество видов на территории второго детского сада;

c – количество видов общих для первого и второго детских садов.

Для нахождения коэффициента Брея-Кертиса (K_{B-C}) использовали следующую формулу 3:

$$K_{B-C} = \frac{2 \sum N_{min}}{N_a + N_b}, \quad 3$$

где N_a – общая сумма растений всех видов, учтенных на территории первого детского сада;

N_b – общая сумма растений всех видов, учтенных на территории второго детского сада;

$\sum N_{min}$ – сумма наименьших значений количественных показателей для каждого таксона, отмеченного на обеих территориях двух детских садов (выбирается наименьший показатель только одного детского сада). Далее эти минимальные значения всех видов суммируются.

Рассчитываемые коэффициенты сходства принимают значения от 0 до 1, где 0 – полное отсутствие таксономического сходства, 1 – полное сходство.

Коэффициенты Жаккара и Серенсена учитывают только факт встречаемости таксонов на объектах без учета количественных соотношений между ними. Коэффициент Брея-Кертиса позволяет учитывать не только наличие общих таксонов сравниваемых детских садов, но и количественные соотношения между ними.

Весь спектр полученных данных обрабатывался с помощью современных методов математической статистики.

Результаты и обсуждение

В ходе исследований установлено, что дендрофлора обследованных объектов представлена 50 видами деревьев и кустарников, принадлежащих к 34 родам (Арония, Береза, Боярышник, Вишня, Дуб, Жимолость, Ива, Ильм, Ирга, Калина, Карагана, Клен, Курильский чай, Липа, Листенница, Малина, Можжевельник, Облепиха, Ольха, Пузыреплодник, Роза, Рябина, Рябинник, Свидина, Сирень, Смородина, Снежноягодник, Спирея, Сосна, Тополь, Туя, Черемуха, Яблоня, Ясень), которые объединены в 16 семейств (Березовые, Бобовые, Буковые, Жимолостные, Ивовые, Ильмовые, Калиновые, Кизилые, Кипарисовые, Кленовые, Крыжовниковые, Липовые, Лоховые, Маслиновые, Розоцветные, Сосновые).

Все учтенные виды по жизненной форме классифицируются на деревья и кустарники (рис. 2). К деревьям отнесены и переходные виды, то есть те, которые могут иметь жизненную форму либо дерева, либо кустарника: рябина обыкновенная, черемуха обыкновенная, ива пятилисточниковая, сосна горная и туя западная.

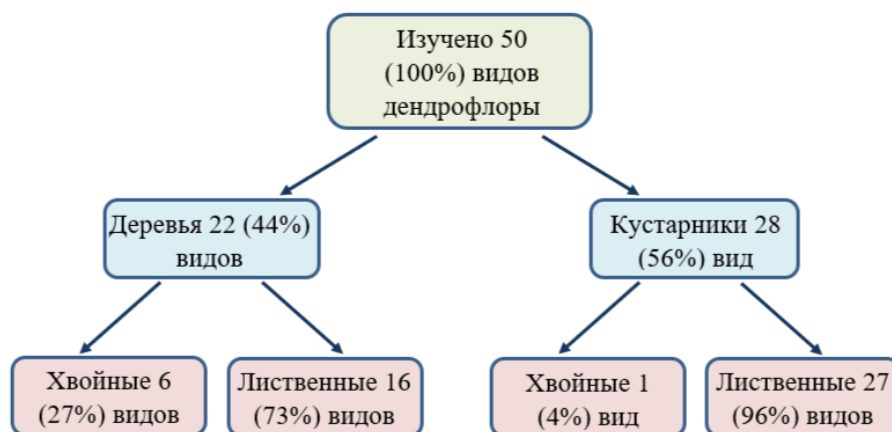


Рисунок 2. Структура дендрофлоры изученных объектов
Figure 2. The structure of the dendroflora of the studied objects

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На исследуемых объектах аборигенные виды деревьев составляют 45% или 10 пород (рис.

3), в то время как на долю интродуцированных приходится 12 видов.

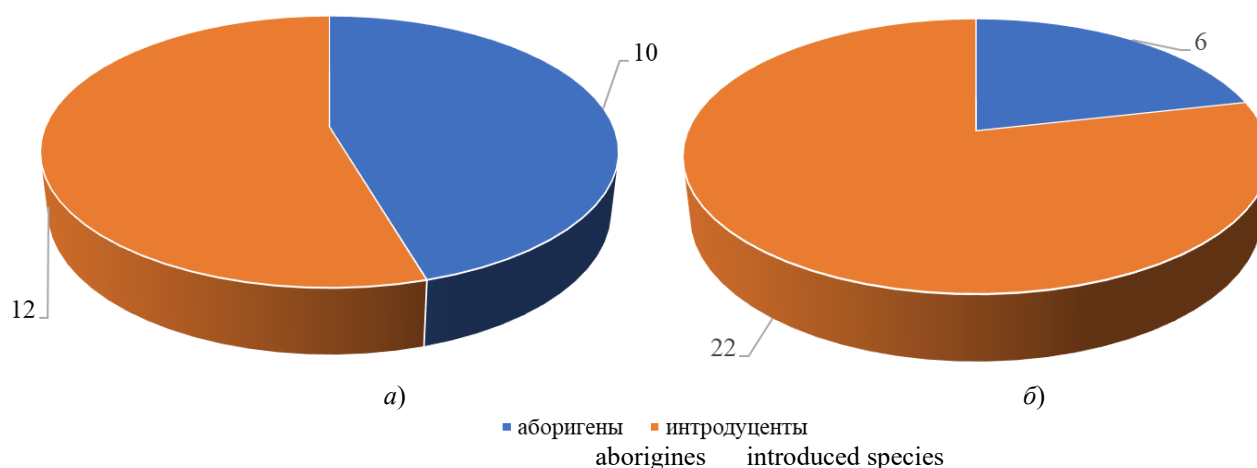


Рисунок 3. Происхождение учтенных деревьев (а) и кустарников (б) на территории детских садов
Figure 3. Origin of the registered trees (a) and shrubs (b) on the territory of kindergartens

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Хвойные растения представлены деревьями и кустарниками, но их доля незначительна – всего 1,1% от всех учтенных экземпляров (табл. 1). Так, из деревьев наиболее распространенная ель обыкновенная встречается всего на территории 50% исследуемых объектов, сосна обыкновенная – 39%, лиственница сибирская – 28%, сосна кедровая сибирская – 17%, туя западная – 11%, сосна горная – 1% (рис. 4 а). Из кустарников (рис. 4 б) – можжевельник обыкновенный произрастает лишь на территории одного детского сада.

Естественные науки и лес

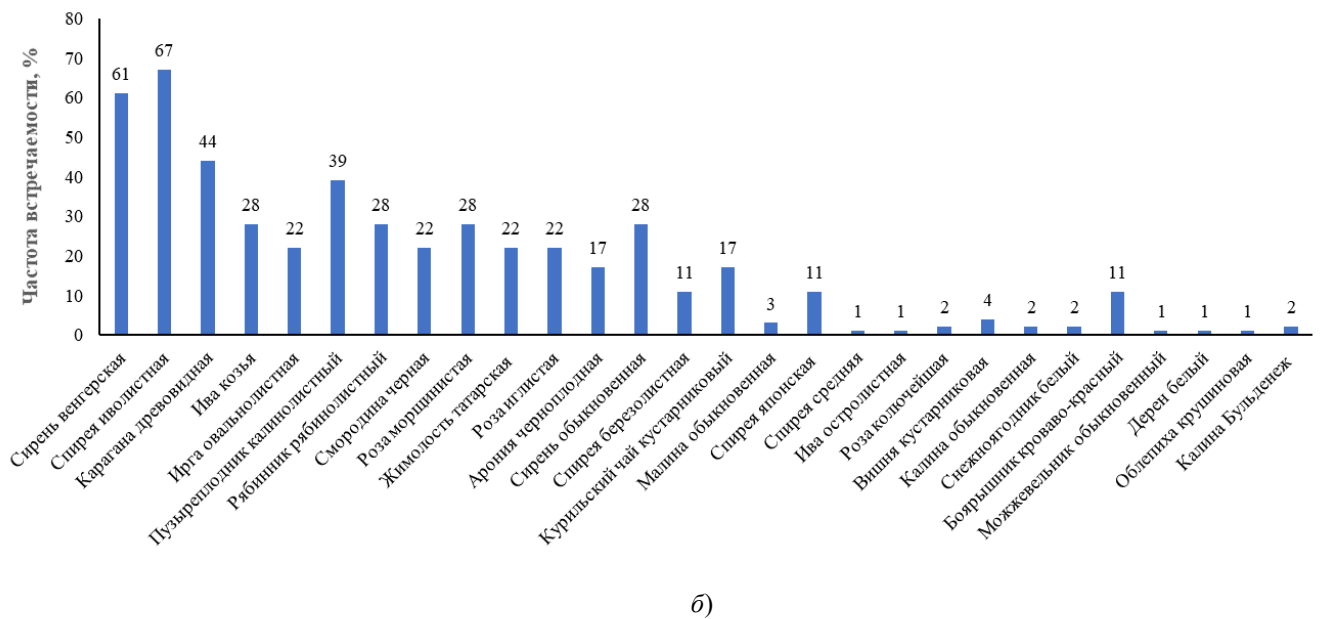
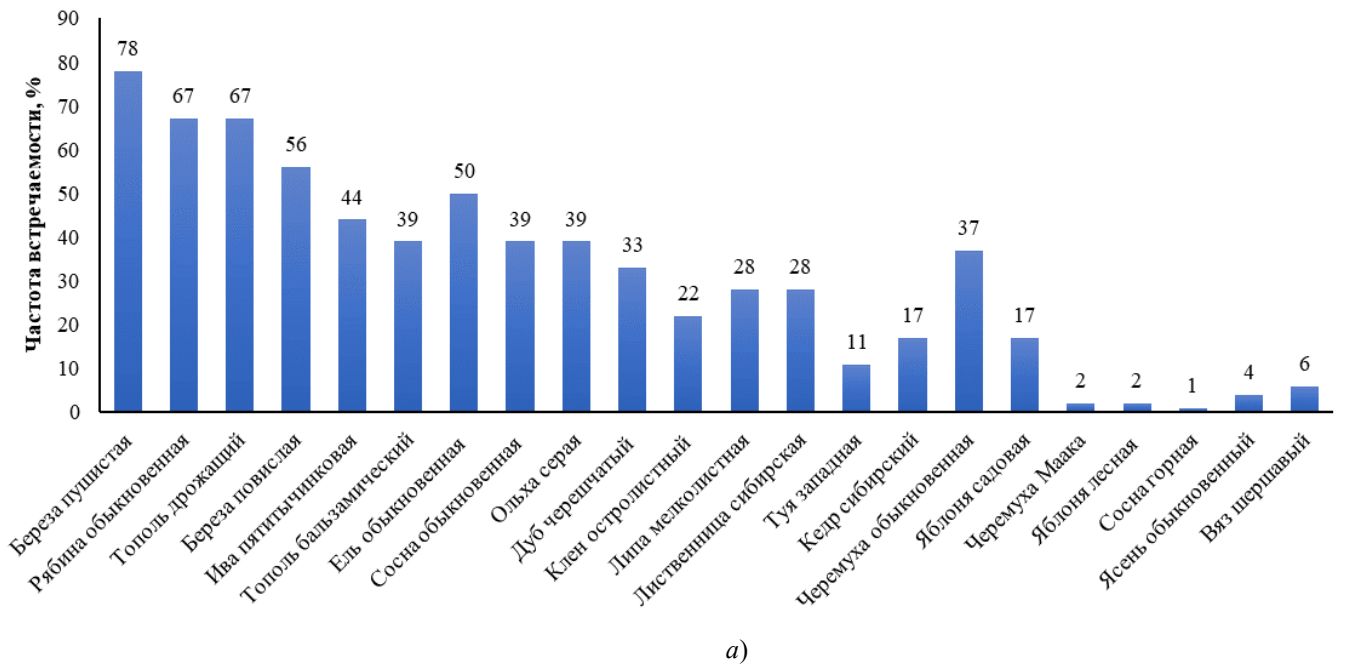


Рисунок 4. Частота встречаемости видов деревьев (а) и кустарников (б) на изучаемых объектах
Figure 4. Frequency of occurrence of tree (a) and shrub (b) species at the studied sites
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Количество учтенных экземпляров растений на объектах

Таблица 1

Table 1

The number of registered plant specimens on the objects

No	Название вида Type name	Количество учтенных экземпляров Number of registered copies		Число объектов с данным видом The number of objects with this type
		шт. pcs.	%	
Деревья tree				
1	Larix sibirica Ledeb.	17	0.3	5

Естественные науки и лес

No	Название вида Type name	Количество учтенных экземпляров Number of registered copies		Число объектов с данным видом The number of objects with this type
		шт. pcs.	%	
2	<i>Pinus sylvestris</i> L.	31	0.5	7
3	<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	438	6.6	15
4	<i>Betula pendula</i> Roth.	185	2.8	9
5	<i>Salix pentandra</i> L.	85	1.3	8
6	<i>Tilia cordata</i> Mill.	10	0.2	5
7	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench.	30	0.4	7
8	<i>Sorbus aucuparia</i> L.	138	2.1	14
9	<i>Populus balsamifera</i> L.	85	1.3	7
10	<i>Populus tremula</i> L.	91	1.4	12
11	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.	21	0.3	9
12	<i>Pinus mugo</i> Turra.	1	ед only once	1
13	<i>Quercus robur</i> L.	15	0.2	6
14	<i>Acer platanoides</i> L.	11	0.2	4
15	<i>Malus sylvestris</i> (L.) Mill.	2	ед only once	1
16	<i>Malus domestica</i> (Suckow) Borkh.	6	0.1	3
17	<i>Padus avium</i> Mill.	23	0.3	7
18	<i>Padus maackii</i> (Rupr.) Kom.	2	ед only once	1
19	<i>Thuja occidentalis</i> L.	3	ед only once	2
20	<i>Pinus sibirica</i> Rupr.	4	0.1	3
21	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	4	0.1	1
22	<i>Ulmus glabra</i> Huds.	6	0.1	1
Кустарники shrub				
1	<i>Lonicera tatarica</i> L.	45	0.7	4
2	<i>Salix caprea</i> L.	20	0.3	5
3	<i>Salix acutifolia</i> Willd.	1	ед only once	1
4	<i>Caragana arborescens</i> Lam.	76	1.1	8
5	<i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim	77	1.2	7
6	<i>Rosa rugosa</i> Thunb.	13	0.2	5
7	<i>Rosa acicularis</i> Lindl.	10	0.2	4
8	<i>Rosa spinosissima</i> L.	2	ед only once	1
9	<i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A.Braun	30	0.4	5
10	<i>Aronia melanocarpa</i> (Michx.) Elliott	17	0.3	3
11	<i>Syringa josikaea</i> J. Jacq. ex Reichenb.	100	1.5	11
12	<i>Syringa vulgaris</i> L.	12	0.1	5
13	<i>Spiraea salicifolia</i> L.	4958	74.8	12
14	<i>Spiraea japonica</i> L.f.	10	0.2	2
15	<i>Spiraea media</i> Schmidt	1	ед only once	1
16	<i>Spiraea betulifolia</i> Pall.	4	0.1	3
17	<i>Cerasus fruticosa</i> Pall.	4	0.1	1
18	<i>Viburnum opulus f. roseum</i> (L.) Hegi	2	ед only once	1
19	<i>Viburnum opulus</i> L.	2	ед only once	1
20	<i>Ribes nigrum</i> L.	9	0.1	4
21	<i>Crataegus sanguinea</i> Pall.	3	ед only once	2
22	<i>Pentaphylloides (Dasiphora) fruticosa</i> (L.) O. Schwarz	9	0.1	3
23	<i>Amelanchier ovalis</i> Medik.	4	0.1	4
24	<i>Juniperus communis</i> L.	1	ед only once	1
25	<i>Symphoricarpos albus</i> (L.) S.F. Blake	2	ед only once	1
26	<i>Rubus idaeus</i> L.	3	ед only once	1
27	<i>Cornus alba</i> L.	1	ед only once	1
28	<i>Hippophae rhamnoides</i> L.	1	ед only once	1

No	Название вида Type name	Количество учтенных экземпляров Number of registered copies		Число объектов с данным видом The number of objects with this type
		шт. pcs.	%	
Всего in total		6625	100	-
в т.ч. деревьев trees		1208	18	
кустарников shrubs		5417	82	

Примечание: ед – количество учтенных экземпляров не значительно и составляет менее 0,1%

Note: only once – the number of registered copies is not significant and is less than 0.1%

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Наиболее распространенными при озеленении дошкольных учреждений являются местные породы: береза пушистая *Betula pubescens* Ehrh. (78%) и повислая *Betula pendula* Roth. (56%), рябина обыкновенная *Sorbus aucuparia* L. (67%), тополь дрожащий *Populus tremula* L. (67%) и ива пятилисточниковая (44%). Промежуточное положение занимают сосна обыкновенная (39%), ольха серая (39%), тополь бальзамический (39%), ель обыкновенная (50%), дуб черешчатый (33%), черемуха обыкновенная (37%). Примерно такие же результаты получены М.М. Андроновой и др. [13] при обследовании детских садов в Ломоносовском округе города Архангельска.

Менее представлены виды – лиственница сибирская (28%), липа мелколистная (28%), кедр сибирский (17%), туя западная (11%), клен остролистный (22%), яблоня садовая (17%). В качестве единичных экземпляров можно встретить яблоню лесную (2%), сосну горную (1%), ясень обыкновенный (4%), вяз шершавый (6%), черемуха Маака (2%).

Ассортимент кустарников в обследуемых детских садах более разнообразен. В 12 из 18 обследуемых объектах произрастает спирея иволистная *Spiraea salicifolia* L., в 11 - сирень венгерская *Syringa josikaea* J. Jacq. ex Rehb., в 8 - карагана древовидная *Caragana arborescens* Lam. Чуть менее распространены пузыреплодник калинолистный *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim, ива козья *Salix caprea* L., рябинник рябинолистный *Sorbaria sorbifolia* (L.) A.Braun., роза морщинистая *Rosa rugosa* Thunb., сирень обыкновенная *Syringa vulgaris* L. На одном объекте отмечены ива остролистная, роза колючейшая, спирея средняя, вишня кустарниковая, калина Бульденеж, калина обыкновенная, можжевельник обыкновенный,

снежноягодник белый, малина обыкновенная, дерен белый, облепиха крушиновая.

Относительно количества произрастающих экземпляров каждого вида отметим, что абсолютным лидером среди деревьев на исследуемых объектах является береза пушистая – 438 шт. Среди лидеров (представленность растений более 100 шт.) также можно назвать березу повислую (185 шт.) и рябину обыкновенную (138 шт.). Эти местные породы являются несомненными лидерами и в озеленении иных городских объектов Архангельска.

Менее популярны и встречаются как уникальные, редкие виды, сосна горная (произрастает в одном экземпляре всего на территории одного детского сада), яблоня лесная (2 шт.), черемуха Маака (2 шт.) и ясень обыкновенный (4 шт.).

Среди кустарников наиболее представлен вид – спирея иволистная (4958 шт.). Это растение чаще всего встречается в виде живых изгородей, реже - одиночных посадках. Второе место по количеству произрастающих экземпляров принадлежит сирени венгерской (100 шт.), пузыреплоднику калинолистному (77 шт.) и карагана древовидной (76 шт.). С помощью этих видов формируют рядовые посадки, плотные живые изгороди, декоративные группы, солитеры.

Единично произрастающие породы (на территории одного детского сада в одном экземпляре) представлены ивой остролистной, спиреей средней, можжевельником обыкновенным, дереном белым, облепихой крушиновой.

При анализе количества видового разнообразия деревьев и кустарников установлено значительное варьирование на обследованных территориях дошкольных учреждений (рис. 5).

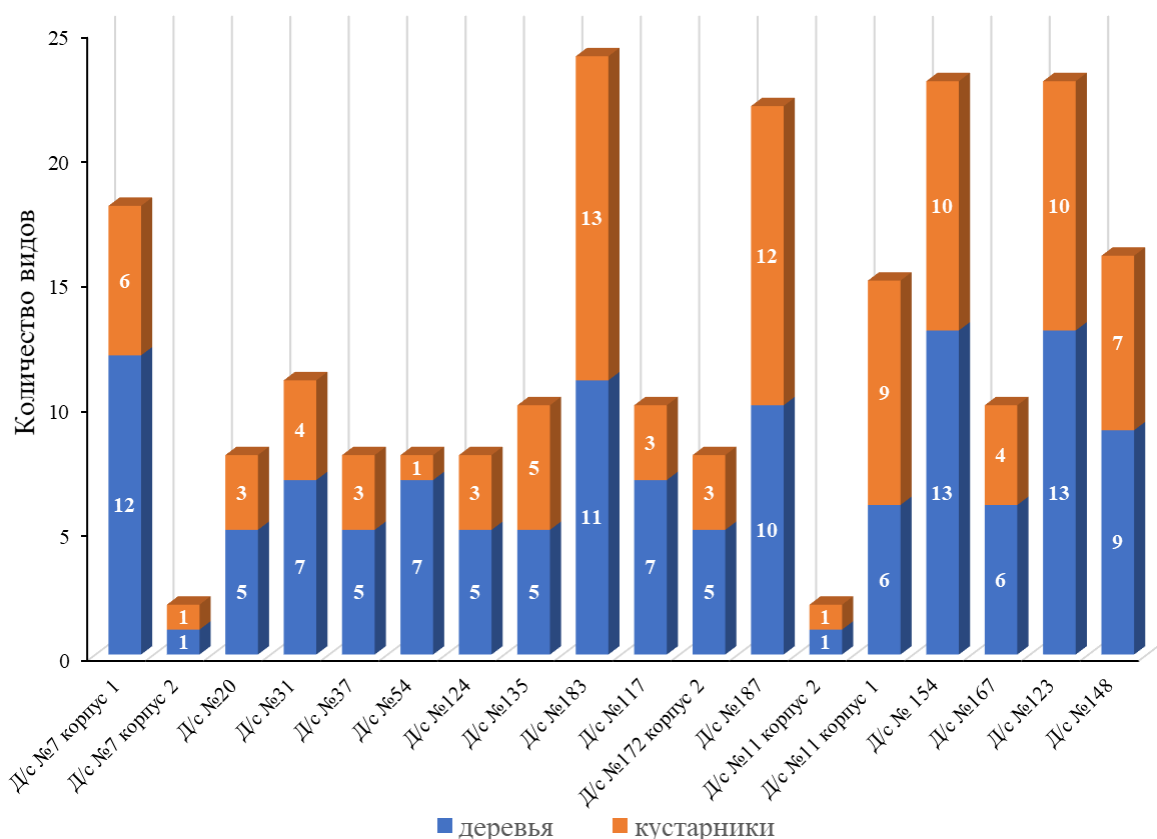


Рисунок 5. Количественный состав видов древесно-кустарниковой растительности на территории изучаемых объектов (шт.)

Figure 5. Quantitative composition of tree and shrub vegetation species on the territory of the studied objects

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Проведенные исследования показали, что на территории четырех детских садов (№183, 187, 154 и 123) произрастает наибольшее количество видов деревьев и кустарников. Так, в границах дошкольного учреждения №154 высажено 13 видов деревьев и 10 видов кустарников, на территории детского сада №187 – 10 пород деревьев и 12 пород кустарников, № 123 – 13 пород деревьев и 10 пород кустарников. Максимальный количественный состав видов дендрофлоры (11 видов деревьев и 13 видов кустарников) отмечен на участке детского сада №183.

В детских садах №7 корпус 2 и 11 корпус 2 видовой состав самый немногочисленный: всего 1 вид дерева и 1 вид кустарника.

Скучный ассортимент древесно-кустарниковой растительности (по 8 видов) отмечен также на территории дошкольных учреждений №20, 37, 54, 124 и 172 корпус 2.

Состав и структура зеленых насаждений на территории дошкольных учреждений должны быть такими, которые смогут в наивысшей степени обеспечивать познавательную функцию, развивать у детей эстетический вкус и улучшать архитектурно-художественный облик детских садов.

Данные о количественном составе деревьев и кустарников в обследуемых ДОУ в зависимости от площади озеленения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Количественный состав дендрофлоры детских садов, шт.

Table 2

The quantitative composition of the dendroflora of preschool institutions, pcs.

Количество Растений Number of plants	Жизненная форма Life form	Номер детского сада Kindergarten number								
		7к.1	7к.2	20	31	37	54	124	135	183

Естественные науки и лес

нормативное regulatory	Д tree	56	87	70	50	51	23	75	57	56
	К shrub	845	1309	1047	756	758	341	1124	853	839
фактическое actual	Д tree	52	3	75	76	35	72	53	66	118
	К shrub	1039	2400	9	24	71	5	27	11	65
Количество растений Number of plants	Жизненная форма Life form	Номер детского сада Kindergarten number								
		117	172	187	11к.2	11к.1	154	167	123	148
нормативное regulatory	Д tree	29	34	42	132	61	72	43	104	57
	К shrub	437	511	634	1976	909	1147	650	1553	850
фактическое actual	Д tree	32	31	62	6	140	94	41	199	53
	К shrub	77	1006	52	500	41	41	4	18	26

Примечание: Нормативные и фактические данные приведены в пересчете на площадь озеленение каждого объекта исследований

Note: The normative and actual data are given in terms of the area of landscaping of each research facility

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Проанализировав имеющееся количество таксонов на территории обследуемых объектов нами установлено, что нормативным данным [20] в той или иной степени соответствует число представителей дендрофлоры на участках садов № 7 корпус 1 и № 172. Количество деревьев на площади отвечает нормам в детских садах № 20, 31, 54, 135, 183, 117, 187, 11 корпус 1, 167, 123, 148. В некоторых садах этот показатель значительно превосходит нормативные данные (например, № 31, 54, 183, 187, 11 корпус 1, 123).

Относительно кустарниковых пород отметим, что их представленность соотносится с нормативным только в дошкольном учреждении № 7 корпус 2. Во всех остальных исследуемых объектах число кустарников значительно ниже нормативных показателей.

Биоразнообразие (биологическое разнообразие) – одно из ключевых понятий

современной экологии. Биоразнообразие подразумевает разнородность и многообразие всех форм жизни на разных уровнях ее организации.

Для района исследований с суровыми климатическими условиями характерен скудный ассортимент местной дендрофлоры. Поэтому увеличение видового разнообразия на объектах ландшафтной архитектуры путем интродукции деревьев и кустарников, в том числе и на территории дошкольных учреждений, крайне необходимо с целью формирования комфортной, экологически безопасной образовательной среды.

Для оценки схожести таксономических составов исследуемых детских садов мы рассчитывали коэффициент Жаккара (табл. 3), коэффициент Сьеренсена (табл. 4) и коэффициент Брея-Кертиса (табл. 5).

Таблица 3

Матрица таксономического сходства обследованных объектов на основании коэффициента Жаккара

Table 3

The matrix of taxonomic similarity of the surveyed objects based on the Jaccard coefficient

№ д/с No k/g	7к. 1	7к. 2	20	31	37	54	12 4	13 5	18 3	11 7	17 2 к.2	18 7	11к. 2	11к. 1	15 4	16 7	12 3	14 8
7 к.1	1.0 0	0.0 5	0.2 4	0.2 6	0.2 7	0.2 0	0.0 4	0.1 7	0.1 8	0.2 7	0.0 8	0.2 9	0.11	0.21	0.2 6	0.2 2	0.3 1	0.3 1
7 к.2	0.0 5	1.0 0	0	0	0.0 9	0	0	0.1 0	0.0 9	0.2 0	0.2 5	0.0 9	0.33	0.12	0.1 0	0.0 9	0.0 4	0.1 2
20	0.2 4	0	1.0 0	0.2 6	0.3 8	0.2 7	0.3 0	0.3 1	0.2 5	0.1 2	0.1 4	0.1 5	0	0.20	0.2 6	0.5 0	0.2 4	0.2 0
31	0.2 6	0	0.2 6	1.0 0	0.3 1	0.3 1	0.2 3	0.1 8	0.1 8	0.2 3	0.1 2	0.3 8	0	0.35	0.3 9	0.3 1	0.4 2	0.3 5
37	0.2 7	0.0 9	0.3 8	0.3 1	1.0 0	0.3 3	0.1 5	0.3 6	0.2 8	0.1 8	0.1 3	0.2 3	0.09	0.30	0.2 9	0.2 5	0.2 7	0.2 4
54	0.2 0	0	0.2 7	0.3 1	0.3 3	1.0 0	0.2 2	0.1 5	0.1 7	0.2 3	0.0 8	0.1 7	0	0.10	0.0 8	0.4 5	0.1 6	0.1 6

124	0.0 4	0	0.3 0	0.2 3	0.1 5	0.2 2	1.0 0	0.2 7	0.1 3	0.0 7	0.3 0	0.1 3	0	0.11	0.1 3	0.2 5	0.1 2	0.1 1
135	0.1 7	0.1 0	0.3 1	0.1 8	0.3 6	0.1 5	0.2 7	1.0 0	0.2 9	0.2 7	0.3 1	0.1 5	0.09	0.19	0.2 0	0.1 9	0.1 9	0.2 5
183	0.1 8	0.0 9	0.2 5	0.1 8	0.2 8	0.1 7	0.1 3	0.2 9	1.0 0	0.2 3	0.1 5	0.4 2	0.04	0.36	0.2 6	0.2 8	0.2 9	0.3 6
117	0.2 7	0.2 0	0.1 2	0.2 3	0.1 8	0.2 3	0.0 7	0.2 7	0.2 3	1.0 0	0.2 0	0.2 8	0.09	0.13	0.2 9	0.2 5	0.2 2	0.3 0
172к .2	0.0 8	0.2 5	0.1 4	0.1 2	0.1 3	0.0 8	0.3 0	0.3 1	0.1 5	0.2 0	1.0 0	0.1 5	0.25	0.20	0.2 1	0.1 3	0.1 9	0.2 6
187	0.2 9	0.0 9	0.1 5	0.3 8	0.2 3	0.1 7	0.1 3	0.1 5	0.4 2	0.2 8	0.1 5	1.0 0	0.09	0.41	0.4 8	0.3 3	0.3 6	0.5 2
11к. 2	0.1 1	0.3 3	0	0	0.0 9	0	0	0.0 9	0.0 4	0.0 9	0.2 5	0.0 9	1.00	0.06	0.0 9	0	0	0.1 3
11к. 1	0.2 1	0.1 2	0.2 0	0.3 5	0.3 0	0.1 0	0.1 1	0.1 9	0.3 6	0.1 3	0.2 0	0.4 1	0.06	1.00	0.3 2	0.1 3	0.4 4	0.3 9
154	0.2 6	0.1 0	0.2 6	0.3 9	0.2 9	0.0 8	0.1 3	0.2 0	0.2 6	0.2 9	0.2 1	0.4 8	0.09	0.32	1.0 0	0.2 4	0.4 7	0.4 8
167	0.2 2	0.0 9	0.5 0	0.3 1	0.2 5	0.4 5	0.2 5	0.1 9	0.2 8	0.2 5	0.1 3	0.3 3	0	0.13	0.2 4	1.0 0	0.2 2	0.3 0
123	0.3 1	0.0 4	0.2 4	0.4 2	0.2 7	0.1 6	0.1 2	0.1 9	0.2 9	0.2 2	0.1 9	0.3 6	0	0.44	0.4 7	0.2 2	1.0 0	0.3 9
148	0.3 1	0.1 2	0.2 0	0.3 5	0.2 4	0.1 6	0.1 1	0.2 5	0.3 6	0.3 0	0.2 6	0.5 2	0.13	0.39	0.4 8	0.3 0	0.3 9	1.0 0

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Коэффициенты таксономического сходства объектов исследования записаны в ячейках, расположенных на пересечении воображаемых перпендикуляров, опускаемых от соответствующих номеров детских садов. Для одного детского сада выбирается номер из первого столбца матрицы, для

второго детского сада – из первой строчки. На пересечении перпендикуляров, проводимых от номеров одних и тех же детских садов коэффициенты равны 1,00, что говорит о полном сходстве таксономического состава.

Таблица 4
Матрица таксономического сходства обследованных объектов на основании коэффициента Серенсена
Table 4

The matrix of taxonomic similarity of the surveyed objects based on the Sorensen coefficient

№ д/с No k/g	7к. 1	7к. 2	20	31	37	54	12 4	13 5	18 3	11 7	17 2 к.2	18 7	11 к.2	11 к.1	15 4	16 7	12 3	14 8
7 к.1	1.0 0	0.1 0	0.3 8	0.4 1	0.4 3	0.3 3	0.0 9	0.3 0	0.3 0	0.4 3	0.1 5	0.4 5	0.2 0	0.3 5	0.4 1	0.3 6	0.4 9	0.4 7
7 к.2	0.1 0	1.0 0	0	0	0.1 7	0	0	0.1 8	0.1 6	0.3 3	0.4 0	0.1 8	0.5 0	0.2 2	0.1 7	0.1 7	0.0 8	0.2 2
20	0.3 8	0	1.0 0	0.4 2	0.5 6	0.4 3	0.4 6	0.4 7	0.4 0	0.2 2	0.2 5	0.2 7	0	0.3 3	0.4 1	0.6 7	0.3 9	0.3 3
31	0.4 1	0	0.4 2	1.0 0	0.4 8	0.4 7	0.3 7	0.3 0	0.3 0	0.3 8	0.2 1	0.5 4	0	0.5 2	0.5 6	0.4 8	0.5 9	0.5 2
37	0.4 3	0.1 7	0.5 6	0.4 8	1.0 0	0.5 0	0.2 7	0.5 3	0.4 4	0.3 0	0.2 2	0.3 7	0.1 7	0.4 6	0.4 4	0.4 0	0.4 2	0.3 8
54	0.3 3	0	0.4 3	0.4 7	0.5 0	1.0 0	0.3 6	0.2 7	0.2 9	0.3 7	0.1 4	0.2 9	0	0.1 8	0.1 5	0.6 2	0.2 8	0.2 7
124	0.0 9	0	0.4 6	0.3 7	0.2 7	0.3 6	1.0 0	0.4 3	0.2 2	0.1 3	0.4 6	0.2 2	0	0.1 9	0.2 3	0.4 0	0.2 1	0.1 9

Естественные науки и лес

135	0.3 0	0.1 8	0.4 7	0.3 0	0.5 3	0.2 7	0.4 3	1.0 0	0.4 5	0.4 2	0.4 7	0.2 6	0.1 8	0.3 2	0.3 3	0.3 2	0.3 2	0.4 0
183	0.3 0	0.1 6	0.4 0	0.3 0	0.4 4	0.2 9	0.2 2	0.4 5	1.0 0	0.3 7	0.2 7	0.5 9	0.0 8	0.5 3	0.4 2	0.4 4	0.4 4	0.5 3
117	0.4 3	0.3 3	0.2 2	0.3 8	0.3 0	0.3 7	0.1 3	0.4 2	0.3 7	1.0 0	0.3 3	0.4 4	0.1 7	0.2 3	0.4 5	0.4 0	0.3 6	0.4 6
172к. .2	0.1 5	0.4 0	0.2 5	0.2 1	0.2 2	0.1 4	0.4 6	0.4 7	0.2 7	0.3 3	1.0 0	0.2 7	0.4 0	0.3 3	0.3 4	0.2 2	0.3 2	0.4 2
187	0.4 5	0.1 8	0.2 7	0.5 4	0.3 7	0.2 9	0.2 2	0.2 6	0.5 9	0.4 4	0.2 7	1.0 0	0.1 7	0.5 8	0.6 5	0.5 0	0.5 3	0.6 8
11к. 2	0.2 0	0.5 0	0	0	0.1 7	0	0	0.1 8	0.0 8	0.1 7	0.4 0	0.1 7	1.0 0	0.1 1	0.1 7	0	0	0.2 2
11к. 1	0.3 5	0.2 2	0.3 3	0.5 2	0.4 6	0.1 8	0.1 9	0.3 2	0.5 3	0.2 3	0.3 3	0.5 8	0.1 1	1.0 0	0.4 9	0.2 3	0.6 2	0.5 6
154	0.4 1	0.1 7	0.4 1	0.5 6	0.4 4	0.1 5	0.2 3	0.3 3	0.4 2	0.4 5	0.3 4	0.6 5	0.1 7	0.4 9	1.0 0	0.3 9	0.6 4	0.6 5
167	0.3 6	0.1 7	0.6 7	0.4 8	0.4 0	0.6 2	0.4 0	0.3 2	0.4 4	0.4 0	0.2 2	0.5 0	0	0.2 3	0.3 9	1.0 0	0.3 6	0.4 6
123	0.4 6	0.0 8	0.3 9	0.5 9	0.4 2	0.2 8	0.2 1	0.3 2	0.4 4	0.3 6	0.3 2	0.5 3	0	0.6 2	0.6 4	0.3 6	1.0 0	0.5 6
148	0.4 7	0.2 2	0.3 3	0.5 2	0.3 8	0.2 7	0.1 9	0.4 0	0.5 3	0.4 6	0.4 2	0.6 8	0.2 2	0.5 6	0.6 5	0.4 6	0.5 6	1.0 0

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Анализ величин показателей индексов сходства биоразнообразия объектов исследований показал различные данные, рассчитанные с помощью изучаемых коэффициентов. Так, наиболее полное сходство биологических систем изучаемых

объектов прослеживается в матрице, рассчитанной с помощью коэффициента Брея-Кёртиса. Установлено, что из 153 пар соотношений биоценозов в 14 случаях сходство видов составляет более 50% (табл. 5).

Таблица 5

Матрица таксономического сходства обследованных объектов на основании коэффициента Брея-Кёртиса

Table 5

The matrix of taxonomic similarity of the surveyed objects based on the Bray-Curtis coefficient

№ д/с No k/g	7к. 1	7к. 2	20	31	37	54	12 4	13 5	18 3	11 7	17 2 к.2	18 7	11 к.2	11 к.1	15 4	16 7	12 3	14 8
7 к.1	1.0 0	0.5 9	0.0 5	0.0 6	0.0 5	0.0 5	0.0 4	0.0 4	0.0 6	0.0 1	0.9 4	0.0 1	0.6 3	0.0 2	0.0 4	0.0 4	0.0 6	0.0 6
7 к.2	0.5 9	1.0 0	0	0	0.0 1	0	0	0	0.0 1	0.0 2	0.8 4	0.0 1	0.3 4	0.0 1	0.0 1	0.0 1	0.0 1	0.0 1
20	0.0 5	0	1.0 0	0.3 8	0.4 1	0.5 3	0.6 8	0.5 8	0.3 4	0	0.0 1	0.2 4	0	0.0 9	0.1 4	0.3 1	0.2 5	0.3 5
31	0.0 6	0	0.3 8	1.0 0	0.4 4	0.6 8	0.2 7	0.4 7	0.4 6	0.0 4	0.0 1	0.4 0	0	0.2 5	0.3 7	0.5 2	0.5 1	0.4 8
37	0.0 5	0.0 1	0.4 1	0.4 4	1.0 0	0.4 8	0.2 8	0.4 9	0.3 4	0.0 2	0.0 1	0.2 4	0.0 1	0.1 5	0.1 8	0.2 2	0.3 0	0.3 3
54	0.0 5	0	0.5 3	0.6 8	0.4 8	1.0 0	0.4 1	0.6 5	0.4 7	0.0 2	0.0 1	0.2 8	0	0.0 8	0.1 2	0.3 2	0.4 1	0.3 8
124	0.0 4	0	0.6 8	0.2 7	0.2 8	0.4 1	1.0 0	0.5 9	0.3 4	0	0.0 1	0.1 9	0	0.1 1	0.0 8	0.2 6	0.1 6	0.2 9
135	0.0 4	0	0.5 8	0.4 7	0.4 9	0.6 5	0.5 9	1.0 0	0.4 5	0.0 2	0.0 1	0.1 9	0.0 1	0.0 9	0.0 7	0.2 7	0.3 0	0.3 3
183	0.0 6	0.0 1	0.3 4	0.4 6	0.3 4	0.4 7	0.3 4	0.4 5	1.0 0	0.0 2	0.0 3	0.3 0	0.0 2	0.2 7	0.2 3	0.2 3	0.4 4	0.3 3

117	0.0 1	0.0 2	0	0.0 4	0.0 2	0.0 2	0	0.0 2	0.0 2	1.0 0	0.0 1	0.0 5	0	0.0 2	0.0 5	0.0 4	0.0 3	0.0 7
172к .2	0.9 4	0.8 4	0.0 1	0.0 1	0.0 1	0.0 1	0.0 1	0.0 1	0.0 3	0.0 1	1.0 0	0.0 2	0.6 5	0.0 5	0.0 5	0.0 2	0.0 2	0.0 2
187	0.0 1	0.0 1	0.2 4	0.4 0	0.2 4	0.2 8	0.1 9	0.1 9	0.3 0	0.0 5	0.0 2	1.0 0	0.0 1	0.3 5	0.4 8	0.3 6	0.4 1	0.5 2
11к. 2	0.6 3	0.3 4	0	0	0.0 1	0	0	0.0 1	0.0 2	0	0.6 5	0.0 1	1.0 0	0.0 1	0.0 2	0	0	0.0 2
11к. 1	0.0 2	0.0 1	0.0 9	0.2 5	0.1 5	0.0 8	0.1 1	0.0 9	0.2 7	0.0 2	0.0 5	0.3 5	0.0 1	1.0 0	0.3 9	0.1 0	0.3 2	0.3 2
154	0.0 4	0.0 1	0.1 4	0.3 7	0.1 8	0.1 2	0.0 8	0.0 7	0.2 3	0.0 5	0.0 5	0.4 8	0.0 2	0.3 9	1.0 0	0.2 3	0.2 8	0.4 3
167	0.0 4	0.0 1	0.3 1	0.5 2	0.2 2	0.3 2	0.2 6	0.2 7	0.2 3	0.0 4	0.0 2	0.3 6	0	0.1 0	0.2 3	1.0 0	0.2 1	0.2 9
123	0.0 6	0.0 1	0.2 5	0.5 1	0.3 0	0.4 1	0.1 6	0.3 0	0.4 4	0.0 3	0.0 2	0.4 1	0	0.3 2	0.2 8	0.2 1	1.0 0	0.3 9
148	0.0 6	0.0 1	0.3 5	0.4 8	0.3 3	0.3 8	0.2 9	0.3 3	0.3 3	0.0 7	0.0 2	0.5 2	0.0 2	0.3 2	0.4 3	0.2 9	0.3 9	1.0 0

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Схожая картина прослеживается при расчете таксономического сходства дендрофлор по коэффициенту Серенсена (табл. 4). Из 153 пар рассчитываемых показателей, 24 случая сходства таксонов составляет 50-68%.

Сходство видов изучаемых территорий дошкольных учреждений по коэффициенту Жаккара самое минимальное (табл. 3). Здесь более тесная связь прослеживается между дендрофлорами детских садов №148 и №187 – 0,52. Из 153 пар теснота таксономического сходства биологических систем выше 25% установлена в 64 случаях.

Обсуждения

Наиболее представленным семейством среди деревьев является Сосновые (включает два рода: Лиственница и Сосна и пять видов: лиственница сибирская, сосна обыкновенная, сосна кедровая сибирская, сосна горная, ель обыкновенная), среди кустарников – Розоцветные (включает 11 родов: Боярышник, Вишня, Ирга, Курильский чай, Малина, Пузыреплодник, Роза, Рябинник, Спирея, Черемуха, Яблоня и 20 видов: арония черноплодная, боярышник кроваво-красный, вишня кустарниковая, курильский чай кустарниковый, пузыреплодник калинолистный, малина обыкновенная, роза морщинистая, роза иглистая, роза колючейшая, рябинник рябинолистный, спирея березолистная, спирея иволистная, спирея средняя, спирея японская, черемуха Маака, черемуха обыкновенная, яблоня садовая).

Количество учтенных видов характеризуется 22 таксонами деревьев и 28 – кустарников. При изучении дендрофлоры в урбанизированной среде северных городов рядом авторов [18] отмечено 58

видов, Е.Б. Карбасниковой и др. [19] - 59 видов, М.М. Андроновой и др. [13] - 51 вид древесно-кустарниковой растительности, другими исследователями [15] установлено, что в г. Архангельске произрастает 20 пород деревьев и 33 вида кустарника.

В ходе проведения исследований нами установлено, что аборигенные виды деревьев составляют 45% или 10 пород: береза пушистая *Betula pubescens* Ehrh., береза повислая *Betula pendula* Roth, тополь дрожащий *Populus tremula* L., рябина обыкновенная *Sorbus aucuparia* L., сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb., ива пятилисточниковая *Salix pentandra* L., ель обыкновенная *Picea abies* (L.) H. Karst., черемуха обыкновенная *Padus avium* Mill., ольха серая *Alnus incana* (L.) Moench.

В качестве деревьев-интродуцентов учтены 12 видов: тополь бальзамический *Populus balsamifera* L., липа мелколистная *Tilia cordata* Mill., дуб черешчатый *Quercus robur* L., клен остролистный *Acer platanoides* L., яблоня лесная *Malus sylvestris* (L.) Mill., вяз шершавый *Ulmus glabra* Huds., ясень обыкновенный *Fraxinus excelsior* L., черемуха Маака *Padus maackii* (Rupr.) Kom., яблоня садовая *Malus domestica* (Suckow) Borkh., туя западная *Thuja occidentalis* L., сосна кедровая сибирская или кедр сибирский *Pinus sibirica* Rupr., сосна горная *Pinus mugo* Turra.

Кустарники по видовому разнообразию превосходят деревья. Представители аборигенной флоры составляют 6 пород, а именно: ива козья *Salix caprea* L., ива остролистная *Salix acutifolia* Willd., роза иглистая *Rosa acicularis* Lindl., смородина черная *Ribes nigrum* L., можжевельник

обыкновенный *Juniperus communis* L., малина обыкновенная *Rubus idaeus* L.

Интродуцированные кустарники более разнообразны и представлены 22 видами: жимолость татарская *Lonicera tatarica* L., карагана древовидная *Caragana arborescens* Lam., пузыреплодник калинолистный *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim, роза морщинистая *Rosa rugosa* Thunb., роза колючейшая *Rosa spinosissima* L., рябинник рябинолистный *Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun, арония черноплодная *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, сирень венгерская *Syringa josikaea* J. Jacq. ex Reichenb., сирень обыкновенная *Syringa vulgaris* L., спирея иволистная *Spiraea salicifolia* L., спирея японская *Spiraea japonica* L.f., спирея средняя *Spiraea media* Schmidt, спирея березолистная *Spiraea betulifolia* Pall., вишня кустарниковая *Cerasus fruticosa* Pall., калина обыкновенная *Viburnum opulus* L. и ее форма калина Бульденеж *Viburnum opulus f. roseum* (L.) Hegi, боярышник кроваво-красный *Crataegus sanguinea* Pall., курильский чай кустарниковый *Pentaphylloides (Dasiphora) fruticosa* (L.) O. Schwarz, ирга овалнолистная *Amelanchier ovalis* Medik., снежнаягодник белый *Symphoricarpos albus* (L.) S.F. Blake, дерен белый *Cornus alba* L., облепиха крушиновая *Hippophae rhamnoides* L.

При сопоставлении биологического разнообразия деревьев и кустарников на территории обследуемых объектов установлено максимальное сходство рассчитано для пары дошкольных учреждений № 7 корпус 1 и 172 корпус 2 – 0,94. Минимальные показатели таксономического сходства (или вообще отсутствие сходства – значение коэффициента равно 0) фиксируются у пар значений, в состав которых входят детские сады, на территории которых произрастает всего два вида древесно-кустарниковой растительности: № 7 корпус 2 и № 11 корпус 2. К сожалению, аналогичных исследований для территорий дошкольных учреждений в данном регионе не проводилось ранее, что затрудняет обобщающее заключение при сравнении данных. Но полученные нами данные несут ценную информацию и позволяют

в дальнейшем выступить как исходные реперные показатели, характеризующие структуру насаждений детских садов в условиях Арктики в первой четверти XXI столетия.

Выводы

1. Проведенные исследования показали несоответствие фактических параметров озеленения территорий большинства обследованных объектов требованиям действующих нормативов. Нормативным данным в той или иной степени соответствует число представителей дендрофлоры на участках лишь 11% исследуемых детских садов. Количество деревьев на гектар площади отвечает нормам в 61% дошкольных учреждений.

2. На основании исследований установлено, что на 40% обследованных объектов произрастают ядовитые растения (наперстянка, ландыш, нарцисс, снежнаягодник, жимолость татарская и др.). Необходимо тщательно подходить к выбору ассортимента зеленых насаждений, который не должен включать ядовитые растения.

3. Наиболее полное сходство биологических систем изучаемых объектов прослеживается в матрице, рассчитанной с помощью коэффициента Брея-Кёртиса. Установлено, что из 153 пар соотношений биоценозов в 14 случаях сходство видов составляет более 50%.

4. Скудный ассортимент древесных и кустарниковых пород не обеспечивает биоразнообразие на территории дошкольных учреждений, что отражается на качестве образовательного процесса. На территории всего 70% обследуемых объектов произрастают хвойные виды.

7. Полученные результаты могут быть использованы при планировании системы озеленения строящихся объектов, а также при проведении реконструкции имеющихся образовательных учреждений для подбора и корректировки ассортимента флористического состава с целью наиболее полного использования в образовательном процессе.

Список литературы

1. Витюк Е.Ю. Биодренажные каналы и дождевые сады как инструмент благоустройства современного города // Архитектон: известия вузов. - 2022. - № 3 (79). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11.
2. Наливайченко А.А., Скрипников П.Н., Горбов С.Н., Матецкая А.Ю. Исследование биоразнообразия некоторых лесопарковых фитоценозов Ростовской агломерации // Лесотехнический журнал. - 2022. - Т.12. – № 4 (48). – С. 169–184. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/12.
3. Морозова Г.Ю. Жизнеспособность растений в условиях урбанизированной среды // Изв. вузов. Лесн. журн. - 2024. - № 6. – С. 106–120. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-106-120.
4. Жучков Д.В., Глазунов В.А., Третьякова А.С., Фетисов Д.М., Хриченков А.В., Бурцев А.Г. Современное состояние зеленой инфраструктуры города Тюмени // Лесной вестник / Forestry Bulletin. - 2026. - Т.30. – № 1. – С. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2026-1-74-88.

5. Сунгурова Н.Р., Страздаускене С.Р., Стругова Г.Н. Экологические аспекты озеленения детских учреждений // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. - 2023. - № 2 (71). – С. 135-142. DOI: 10.34655/bgsha.2023.71.2.017.
6. Довганюк А.И., Скабёлкина О.А. Проблемы детского восприятия визуальной среды мегаполиса // Лесной вестник / Forestry bulletin. - 2018. - №22 (3). – С. 97-101. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-3-97-101.
7. Примаков Н.В. Перспективность применения древесно-кустарниковых растений в озеленении города Краснодар // Изв. вузов. Лесной журнал. - 2022. - № 1. – С. 98–109. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-98-109.
8. Гладышева О.Д., Шеина С.Г., Федоровская А.А. Современный ландшафтный "Эко" дизайн на территории дошкольного образовательного учреждения // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. - 2023. - № 4 (44). – С. 50-60. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-44-4-50-60.
9. Друп В.Д., Стукало В.А., Степаненко Е.Е., Зеленская Т.Г., Мухина О.В., Халикова В.А. К проблеме озеленения территорий ДОУ (на примере МКДОУ РГБУЗ "Черкесский городской дом ребёнка" г. Черкесск) // Успехи современного естествознания. - 2021. - № 4. – С. 13-20. DOI: 10.17513/use.37601.
10. Charra-Vaskou K., Charrier G., Wortemann R., Beikircher B., Cochard H., Ameglio T., Mayr S. Drought and frost resistance of trees: a comparison of four species at different sites and altitudes. *Annals of Forest Science*. 2012; 69 (3): 325–333. Режим доступа: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00930732>.
11. Крутова А.М., Соколкина А.И. Современные тенденции в благоустройстве и озеленении малого сада // Тенденции развития науки и образования. - 2023. - № 100-4. – С. 171-174. DOI: 10.18411/trnio-08-2023-207
12. Strimbeck G.R., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröde W.P., Kjellsen T.D. Extreme low temperature tolerance in woody plants. *Frontiers in Plant Science*. 2015; 6: Article 884, pp. 1–15. DOI: 10.3389/fpls.2015.00884.
13. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. - 2021. - № 3. – С. 73–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85.
14. Мурадова А.В., Безгина Ю.А., Степаненко Е.Е., Халикова В.А., Зверева О.С. К проблеме озеленения детских образовательных учреждений (на примере МБДОУ № 5 "Аленушка" г. Армянск Республики Крым) // Успехи современного естествознания. - 2023. - № 12. – С. 129-134. DOI: 10.17513/use.38182.
15. Валекжанин А.А., Сунгурова Н.Р. Оценка цветочного оформления общественных пространств г. Архангельска на основе анализа конкурсных закупок по посадке и уходу за цветниками // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. - 2025. - № 3 (80). – С. 63–72. DOI: 10.34655/bgsha.2025.80.3.007.
16. Карташова Н.П., Хазова Е.П. Озеленение территорий высших учебных заведений г. Воронежа // Лесотехнический журнал. - 2021. - Т.11. – № 2 (42). – С. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/8>.
17. Городничев Р.М. и др. Методы экологических исследований. Основы статистической обработки данных: учебно-методическое пособие. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2019. – 94 с. ISBN 978-5-7513-2737-8.
18. Сунгурова Н.Р., Страздаускене С.Р., Стругова Г.Н., Макаров С.С. Состояние зеленых насаждений на территории дошкольных учреждений в г. Архангельске // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - 2023. - № 245. – С. 140-158. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.140-158.
19. Карбасникова Е.Б., Карбасников А.А. Адаптация интродуцентов к зимнему периоду в условиях северной агломерации // Хвойные бореальной зоны. - 2023. - Т.41. – № 6. – С. 479-485. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-479-485.
20. Теодоронский В.С., Сабо Е.Д., Фролов В.А. Строительство и эксплуатация объектов ландшафтной архитектуры. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 352 с. ISBN 978-5-534-07340-9.
21. Barrio I.C., Hik D.S. Herbivory in Arctic Ecosystems. // *Encyclopedia of the World's Biomes*. Oxford: Elsevier, 2020. P. 446–456. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11791-9.

References

1. Vityuk E.Yu. Biodrenazhnye kanavy i dozhdevye sady kak instrument blagoustroystva sovremennogo goroda. [Bio-drainage ditches and rain gardens as a tool for modern city improvement]. *Arkhitckton: izvestiya vuzov = Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022;(79). (In Russ.). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11.
2. Nalivaychenko A.A., Skripnikov P.N., Gorbov S.N., Mateckaya A.Yu. Issledovanie bioraznoobraziya nekotorykh lesoparkovykh fitotsenozov Rostovskoy aglomeratsii. [Study of biodiversity of some forest park phytocenoses of Rostov agglomeration]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2022;12(4):169-184. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/12.

3. Morozova G.Yu. Zhiznesposobnost' rasteniy v usloviyakh urbanizirovannoy sredy. [Plant viability in urbanized environment]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = News of Higher Educational Institutions. Forest Journal*. 2024;(6):106-120. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-106-120.
4. Zhuchkov D.V., Glazunov V.A., Tret'yakova A.S., Fetisov D.M., Khrichenkov A.V., Burtsev A.G. Sovremennoe sostoyanie zelenoy infrastruktury goroda Tyumeni. [Current state of green infrastructure of the city of Tyumen]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2026;30(1):74-88. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2026-1-74-88.
5. Sungurova N.R., Strazdauskene S.R., Strugova G.N. Ekologicheskie aspekty ozeleneniya detskikh uchrezhdeniy. [Ecological aspects of landscaping of children's institutions]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova = Bulletin of Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov*. 2023;(2(71)):135-142. (In Russ.). DOI: 10.34655/bgsha.2023.71.2.017.
6. Dovganyuk A.I., Skabyolkina O.A. Problemy detskogo vospriyatiya vizual'noy sredy megapolisa. [Problems of children's perception of the visual environment of a metropolis]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2018;22(3):97-101. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2018-3-97-101.
7. Primakov N.V. Perspektivnost' primeneniya drevesno-kustarnikovyykh rasteniy v ozelenenii goroda Krasnodar. [Prospects of using woody and shrub plants in landscaping of the city of Krasnodar]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = News of Higher Educational Institutions. Forest Journal*. 2022;(1):98-109. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-98-109.
8. Gladysheva O.D., Sheina S.G., Fedorovskaya A.A. Sovremennyy landshaftnyy "Eko" dizayn na territorii doshkol'nogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya. [Modern landscape "Eco" design on the territory of a preschool educational institution]. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii = Biosphere compatibility: man, region, technologies*. 2023;(4(44)):50-60. (In Russ.). DOI: 10.21869/2311-1518-2023-44-4-50-60.
9. Drup V.D., Stukalo V.A., Stepanenko E.E., Zelenskaya T.G., Mukhina O.V., Khalikova V.A. K probleme ozeleneniya territoriy DOU (na primere MKDOU RGBUZ "Cherkesskiy gorodskoy dom rebyonka" g. Cherkessk). [On the problem of landscaping of preschool educational institutions territories (on the example of MKDOU RGBUZ "Cherkessk city children's home" in Cherkessk)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2021;(4):13-20. (In Russ.). DOI: 10.17513/use.37601.
10. Charra-Vaskou K., Charrier G., Wortemann R., Beikircher B., Cochard H., Ameglio T., Mayr S. Drought and frost resistance of trees: a comparison of four species at different sites and altitudes. *Annals of Forest Science*. 2012;69(3):325-333. (In English). URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00930732>.
11. Krutova A.M., Sokol'kina A.I. Sovremennye tendentsii v blagoustroystve i ozelenenii malogo sada. [Modern trends in landscaping and gardening of a small garden]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the development of science and education*. 2023;(100-4):171-174. (In Russ.). DOI: 10.18411/trnio-08-2023-207.
12. Strimbeck G.R., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröde W.P., Kjellsen T.D. Extreme low temperature tolerance in woody plants. *Frontiers in Plant Science*. 2015;6: Article 884, pp.1-15. DOI: 10.3389/fpls.2015.00884.
13. Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Gaevskiy N.P. Stupenchataya introduktsiya vidov dendroflory v severo-vostochnuyu chast' Russkoy ravniny (obzor). [Stepwise introduction of dendroflora species into the northeastern part of the Russian Plain (review)]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = News of Higher Educational Institutions. Forest Journal*. 2021;(3):73-85. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85.
14. Muradova A.V., Bezgina Yu.A., Stepanenko E.E., Khalikova V.A., Zvereva O.S. K probleme ozeleneniya detskikh obrazovatel'nykh uchrezhdeniy (na primere MBDOU № 5 "Alenushka" g. Armyansk Respubliki Krym). [On the problem of landscaping of children's educational institutions (on the example of MBDOU No. 5 "Alenushka" in Armyansk, Republic of Crimea)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2023;(12):129-134. (In Russ.). DOI: 10.17513/use.38182.
15. Valekzhanin A.A., Sungurova N.R. Otsenka tsvetochnogo oformleniya obshchestvennykh prostranstv g. Arkhangel'ska na osnove analiza konkursnykh zakupok po posadke i ukhodu za tsvetnikami. [Assessment of flower decoration of public spaces in Arkhangel'sk based on the analysis of competitive procurement for planting and care of flower beds]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii imeni V.R. Filippova = Bulletin of Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov*. 2025;(3(80)):63-72. (In Russ.). DOI: 10.34655/bgsha.2025.80.3.007.
16. Kartashova N.P., Khazova E.P. Ozelenenie territoriy vysshikh uchebnykh zavedeniy g. Voronezha. [Landscaping of higher educational institutions territories in Voronezh]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2021;11(2(42)):80-90. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/8>.
17. Gorodnichev R.M. i dr. Metody ekologicheskikh issledovaniy. Osnovy statisticheskoy obrabotki dannykh: uchebno-metodicheskoe posobie. [Methods of ecological research. Fundamentals of statistical data processing: teaching manual]. – Yakutsk: Izdatel'skiy dom SVFU, 2019. – 94 p. ISBN 978-5-7513-2737-8.
18. Sungurova N.R., Strazdauskene S.R., Strugova G.N., Makarov S.S. Sostoyanie zelenykh nasazhdeniy na territorii doshkol'nykh uchrezhdeniy v g. Arkhangel'ske. [The state of green spaces on the territory of preschool institutions

- in Arkhangelsk]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = News of the Saint Petersburg Forestry Engineering Academy*. 2023;(245):140-158. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.140-158.
19. Karbasnikova E.B., Karbasnikov A.A. Adaptatsiya introdutsentov k zimnemu periodu v usloviyakh severnoy aglomeratsii. [Adaptation of introduced species to winter period in conditions of northern agglomeration]. *Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the boreal zone*. 2023;41(6):479-485. (In Russ.). DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-479-485.
20. Teodoronskiy V.S., Sabo E.D., Frolov V.A. Stroitel'stvo i ekspluatatsiya ob"ektov landshaftnoy arkhitektury. [Construction and operation of landscape architecture objects]. – M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2008. – 352 p. ISBN 978-5-534-07340-9.
21. Barrio I.C., Hik D.S. Herbivory in Arctic Ecosystems. *Encyclopedia of the World's Biomes*; V. Dayal et al. eds. Oxford: Elsevier, 2020. P. 446–456. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11791-9.

Сведения об авторах

Страздаускене Светлана Рудольфовна – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5229-1004>, e-mail: svsun@bk.ru.

Сунгурова Наталья Рудольфовна – доктор с.-х. наук, профессор кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>, e-mail: n.sungurova@narfu.ru.

Куприянова Александра Генриховна – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры института ландшафтной архитектуры, строительства и обработки древесины, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., д. 5, литера У, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, e-mail: landscape.kag@yandex.ru.

Макаров Сергей Сергеевич – доктор с.-х. наук, заведующий кафедрой декоративного садоводства и газоноведения, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, 127550, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>, e-mail: s.makarov@rgau-msha.ru.

Шаренкова Марина Геннадьевна – специалист второго отдела, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: m.sharenkova@narfu.ru.

Лазарева Ирина Васильевна – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: lazar0903@mail.ru.

Information about the authors

Svetlana R. Strazdauskene – Postgraduate Student of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5229-1004>, e-mail: svsun@bk.ru.

Natalia R. Sungurova – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>, e-mail: n.sungurova@narfu.ru.

Alexandra G. Kupriyanova – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Landscape Architecture at the Institute of Landscape Architecture, Construction and Wood Processing, St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Institutsky Lane, 5, litera U, 194021, Russian Federation, e-mail: landscape.kag@yandex.ru.

Sergey S. Makarov – Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Decorative Horticulture and Lawn Science, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>, e-mail: s.makarov@rgau-msha.ru.

Marina G. Sharenkova – Specialist of the Second Department, M.V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: m.sharenkova@narfu.ru.

Irina V. Lazareva – Postgraduate Student of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: lazar0903@mail.ru.



Критерии отбора древесно-кустарниковых растений для озеленения теннисных академий в условиях субтропического климата (на примере Южного берега Крыма)

Наталья В. Яковенко, n.v.yakovenko71@gmail.com, 0000-0003-4203-0040

Светлана Ю. Подласкина, podlaskina@mail.ru, 0000-0002-5574-1725

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

Разработана научно-обоснованная система критериев отбора древесно-кустарниковых растений для озеленения теннисных академий в условиях субтропического климата на примере Южного берега Крыма. Актуальность исследования обусловлена отсутствием комплексных нормативных и методических подходов к формированию зелёных насаждений на специализированных спортивных объектах с высокими требованиями к безопасности игроков, качеству игры и санитарно-гигиеническим условиям. В работе выделены пять групп критериев (функционально-игровые, экологические, фитосанитарные, архитектурно-декоративные и агротехнические), включающие 20 частных параметров. Методом парных сравнений (анализ иерархий Саати) определены весовые коэффициенты групп; наибольший вес (0,35) присвоен функционально-игровым критериям, что отражает приоритет безопасности спортсменов и качества игры. Разработана 4-балльная шкала оценки каждого параметра и аддитивная формула расчёта интегрального балла (от 0 до 100). Установлены жёсткие ограничения по затенению (на основе стандартов ITF), аллергенности, травмоопасности, листопаду, плодоношению и инвазивности. Апробация методики проведена на 28 видах, рекомендованных Никитским ботаническим садом для ЮБК. Наивысшие интегральные баллы («отлично», $I \geq 90$) получили *Sabal palmetto*, *Cupressus sempervirens* и *Olea europaea*; хорошие результаты ($75 \leq I < 90$) – *Juniperus excelsa*, *Butia capitata*, *Magnolia grandiflora* 'Little Gem', *Ginkgo biloba* 'Fastigiata' и *Laurus nobilis*. Виды с $I < 60$ (включая *Platanus* × *acerifolia*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Ailanthus altissima*) исключены из ассортимента для прикортковых зон. Предложены минимальные безопасные расстояния от деревьев до корта (6–20 м в зависимости от типа кроны) и алгоритм последовательной проверки ограничений. Разработанная система может быть адаптирована для других спортивных объектов (футбольные поля, гольф-клубы) и регионов со сходным климатом.

Ключевые слова: озеленение, теннисная академия, субтропический климат, Южный берег Крыма, древесно-кустарниковые растения, критерии отбора, интегральная оценка, безопасность игроков, аллергенность, затенение кортов

Финансирование: без внешнего финансирования

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Яковенко, Н. В. Критерии отбора древесно-кустарниковых растений для озеленения теннисных академий в условиях субтропического климата (на примере Южного берега Крыма) / Н. В. Яковенко, С. Ю. Подласкина // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 135–154. – Библиогр.: с. 152–154 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/9>.

Поступила 14.01.2026. Пересмотрена 18.03.2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Criteria for selecting woody and shrubby plants for landscaping tennis academies under subtropical climate (exemplified by the Southern Coast of Crimea)

Nataliya V. Yakovenko, n.v.yakovenko71@gmail.com,  0000-0003-4203-0040
Svetlana Yu. Podlaskina, podlaskina@mail.ru,  0000-0002-5574-1725

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

Abstract

A scientifically based system of criteria for selecting tree and shrub species for landscaping tennis academies in subtropical climate conditions has been developed, using the Southern Coast of Crimea as a case study. The relevance of the study is due to the lack of integrated regulatory and methodological approaches for the formation of green spaces at specialised sports facilities with high requirements for player safety, playing quality, and sanitary-hygienic conditions. Five groups of criteria (functional-game, ecological, phytosanitary, architectural-decorative, and agrotechnical) comprising 20 specific parameters were identified. Pairwise comparison (Saaty's analytic hierarchy process) was used to determine the weighting coefficients of the groups; the highest weight (0.35) was assigned to the functional-game criteria, reflecting the priority of athlete safety and playing quality. A 4-point scale for each parameter and an additive formula for calculating the integral score (from 0 to 100) were developed. Strict restrictions on shading (based on ITF standards), allergenicity, injury hazard, leaf fall, fruiting, and invasiveness were established. The methodology was tested on 28 species recommended by the Nikitsky Botanical Garden for the Southern Coast of Crimea. The highest integral scores ("excellent", $I \geq 90$) were obtained for *Sabal palmetto*, *Cupressus sempervirens*, and *Olea europaea*; good results ($75 \leq I < 90$) – for *Juniperus excelsa*, *Butia capitata*, *Magnolia grandiflora* 'Little Gem', *Ginkgo biloba* 'Fastigiata', and *Laurus nobilis*. Species with $I < 60$ (including *Platanus × acerifolia*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Ailanthus altissima*) were excluded from the near-court planting assortment. Minimum safe distances from trees to the court (6–20 m depending on the crown type) and a sequential restriction-checking algorithm are proposed. The developed system can be adapted for other sports facilities (football fields, golf clubs) and regions with similar climates.

Keywords: landscaping, tennis academy, subtropical climate, Southern Coast of Crimea, tree and shrub plants, selection criteria, integral assessment, player safety, allergenicity, court shading

Funding: This study received no external funding.

Acknowledgements: The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this article.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

For citation: Yakovenko N. V., Podlaskina S. Yu. (2026) Criteria for selecting woody and shrubby plants for landscaping tennis academies under subtropical climate (exemplified by the Southern Coast of Crimea). Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 135–154 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/9>.

Received 14.01.2026.

Revised 18.03.2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Озеленение теннисных академий представляет собой многокритериальную задачу на стыке ландшафтной архитектуры, дендрологии и спортивной инженерии. Как показано в работах, посвящённых влиянию географических факторов на спортивную инфраструктуру (Баскаков и др., 2022) и концепциям ландшафтного формирования спортивных площадок (Холодова, Снытко, 2024), качественное озеленение обеспечивает

безопасность, микроклимат и ветрозащиту. Однако комплексной системы критериев для теннисных академий в субтропиках не разработано.

В исследованиях по методологии градостроительного нормирования озеленённых территорий (Базилевич, 2018) показана устарелость действующих нормативов, отсутствие связи с экологическими и социальными показателями. Предложенное понятие

«демоэкосистемы» созвучно многокритериальному подходу настоящего исследования. Принцип устойчивого развития территорий как базовый для градостроительной экологии (Воронина, 2024) также предполагает комплексную оценку. Экологические функции растительности (регуляция газового состава, фитонциды, микроклимат, шумозащита, аллергенность) детально рассмотрены в работе, посвящённой проблемам современного озеленения (Майсурадзе, 2021), что обосновывает включение аллергенности в критерии для теннисных академий.

Наиболее близкий по климату к ЮБК регион — Сочинское Причерноморье (влажные субтропики). Анализ состояния озеленения Сочи (Клемешова, Келина, Слепченко, 2019) выявил территориальную неравномерность и дефицит ухода. Разработанный ассортимент адаптивных лиственных деревьев для прибрежной зоны (Клемешова, Карпун, 2025) включает виды (*Laurus nobilis*, *Magnolia grandiflora*, *Ginkgo biloba*), присутствующие и в нашем перечне. Проблемы интродукции красивоцветущих кустарников на Черноморском побережье (Карпун, 2008) и климатическая характеристика субтропических многолетников (Селянинов, 1961) дают основу для экологических критериев (засухоустойчивость, солеустойчивость, ветроустойчивость, толерантность к известковым почвам).

Опыт озеленения в аридной зоне (Семенютина, Ноянова, 2019) показывает необходимость реконструкции 65–70% старовозрастных насаждений и расширения биоразнообразия. В работе по интеграции растений и парковых сооружений (Курапина, Медведицкова, 2024) предложен ассортимент засухо- и солеустойчивых видов, а также зонирование территории (0–2, 2–5, 5–10 м), что адаптировано нами для прикортных зон. Ландшафтно-экологический подход к проектированию (Артюхова, Пономаренко, Наумова, 2023) также предполагает зонирование по степени антропогенного воздействия.

Важность учёта токсичности и аллергенности декоративных растений в общественных зелёных зонах подчёркнута в масштабном исследовании, проведённом на Сицилии (Domina и др., 2024) — регионе, климатически аналогичном ЮБК. Обследовав 100 парков и садов, авторы выявили 137 опасных таксонов (108 ядовитых, 32 аллергенных), среди которых смертельно опасные *Nerium oleander*, *Melia azedarach*, *Ricinus communis* и сильные аллергены *Cupressus sempervirens*, *Olea europaea*. Рекомендовано исключать такие виды из зон, посещаемых детьми, предпочитать женские особи двудомных растений для снижения пыльцевой

нагрузки и устанавливать барьеры. Эти выводы напрямую применимы к теннисным академиям: аллергенность учтена в нашей функционально-игровой группе критериев, а травмобезопасность включает исключение видов с ядовитыми плодами (*Juglans regia*).

В эксплуатации открытых спортивных сооружений способность древесных насаждений модулировать микроклиматические параметры посредством затенения и эвапотранспирационного охлаждения выступает стратегическим фактором. Исследования Jiao et al. (2024) демонстрируют выраженный синергизм между характеристиками подстилающей поверхности и архитектоникой кроны, что существенно усиливает общий охлаждающий эффект. Указанные положения легли в основу включения в экологические критерии оценки показателей засухоустойчивости и толерантности к интенсивной инсоляции.

В контексте задач цифровизации процесса отбора растительного материала был выполнен анализ модели PlasME (Pacheco, Finotti, 2022). Данная модель сфокусирована на рациональном проектировании зелёной инфраструктуры, учитывая ее функционально-экологические характеристики. Методологические принципы, лежащие в основе упомянутой модели, обнаруживают корреляцию с подходами к формированию интегрального индекса (I), который разработан в рамках текущего исследования. Индекс (I) сконструирован как аддитивная свертка оценок, полученных по пяти группам критериев, с применением дифференцированных весовых коэффициентов. Это обеспечивает объективную оценку пригодности видов для их использования в ландшафтном дизайне спортивных кластеров.

В сфере экологического сетевого планирования урбанизированных ландшафтов, работа Shuang Song et al. (2024), выполненная на примере Харбина, рассматривает подходы к интеграции пространственной структуры, экологических процессов и социальных функций зеленых насаждений.

Стандарты ITF (International Tennis Federation, 2024) и рекомендации по газонным травмам для теннисных кортов (BSPB, 2026) дополняют нормативную базу.

Анализ литературы подтверждает отсутствие комплексной критериальной системы для озеленения теннисных академий в субтропиках. Настоящее исследование восполняет этот пробел, предлагая многокритериальную систему, интегрирующую функционально-игровые, экологические, фитосанитарные, архитектурно-декоративные и агротехнические требования с весовыми коэффициентами.

Цель работы — разработать научно обоснованную систему критериев отбора древесно-кустарниковых растений для озеленения теннисных академий в условиях Южного берега Крыма. Задачи: проанализировать климатические и почвенные ограничения региона, выделить группы критериев (функционально-игровые, экологические, фитосанитарные, архитектурно-декоративные, агротехнические), предложить балльную методику интегральной оценки видов и апробировать её на перспективном ассортименте для проектируемой теннисной академии в г. Алупка.

Материалы и методы

Объект исследования

Объектом исследования является проектируемый Олимпийский комплекс «Теннисная академия», расположенный в г. Алупка (44°25'11" с.ш., 34°02'35" в.д.). Климат района исследования — сухой субтропический средиземноморского типа. Почвенный покров представлен коричневыми тяжелосуглинистыми и легкосуглинистыми почвами, характеризующимися тесной корреляционной связью между осадками и гидрологическими свойствами). Для оптимизации водного режима этих почв требуется дополнительное увлажнение в размере 416 ± 188 мм/год. Рельеф территории предгорный, со значительным перепадом высот, что подтверждается наличием в проектных решениях подпорных стен общим объёмом 5868 м^3 и вертикальной планировкой территории площадью $98\,254 \text{ м}^2$. Сейсмичность района достигает 9 баллов.

Методика разработки системы критериев

Разработка системы критериев осуществлялась в несколько этапов (рис.1).

Этап 1. Идентификация критериев. На основе анализа научной литературы (Теодоронский, 2003; Сокольская, 2004; Боговая, Теодоронский, 2010; Гостев, 2001) и нормативных документов были выделены 5 групп критериев, охватывающих 20 параметров: функционально-игровые (6 параметров), экологические (5 параметров), фитосанитарные (3 параметра), архитектурно-декоративные (3 параметра) и агротехнические (3 параметра). Каждый параметр получил чёткое определение и диапазон возможных значений.

Этап 2. Определение весовых коэффициентов. Для определения относительной значимости групп критериев применён метод парных сравнений (метод анализа иерархий Саати). Экспертная оценка проводилась с привлечением трёх специалистов в области ландшафтной архитектуры и дендрологии. Для каждой пары групп критериев определялось

отношение их важности по шкале от 1 (равная важность) до 9 (абсолютное превосходство). Полученные матрицы парных сравнений были обработаны с вычислением наибольшего собственного числа и вектора приоритетов (Мельников и др., 2019). Итоговые весовые коэффициенты рассчитывались как среднее геометрическое нормализованных значений.

Этап 3. Разработка балльной шкалы. Для каждого из 20 параметров разработана 4-балльная шкала (0–3 балла), где 0 баллов соответствует полному несоответствию требованию (неприемлемо), 1 балл — слабому соответствию (плохо), 2 балла — среднему соответствию (удовлетворительно), 3 балла — полному соответствию (отлично). При определении пороговых значений использовались данные из нормативных документов (СанПиН 1567-76; ИТФ, 2020) и научных публикаций (Огудина, 2017; Гостев, 2001).

Этап 4. Расчёт интегрального балла для оценки пригодности вида.

Для количественного сравнения древесно-кустарниковых растений по степени их пригодности к озеленению теннисной академии разработана многокритериальная балльная методика, основанная на аддитивной свёртке частных показателей с весовыми коэффициентами. Методика базируется на принципах многокритериального анализа решений (МАИ) (Саати, 1993; Ногин, 2002) и адаптирована к специфике спортивно-рекреационного озеленения.

Исходные данные и система обозначений

Введём следующие множества и переменные:

- $G = \{1,2,3,4,5\}$ — множество групп критериев, где:
 - $g = 1$ — функционально-игровые критерии (ФИ),
 - $g = 2$ — экологические критерии (ЭК),
 - $g = 3$ — фитосанитарные критерии (ФС),
 - $g = 4$ — архитектурно-декоративные критерии (АД),
 - $g = 5$ — агротехнические критерии (АГ).
- Для каждой группы $g \in G$ определён весовой коэффициент w_g , отражающий относительную важность данной группы при озеленении теннисной академии. Веса удовлетворяют условию нормировки:

$$\sum_{g=1}^5 w_g = 1, w_g > 0 \forall g.$$

Значения w_g получены методом парных сравнений (анализ иерархий) с привлечением экспертов-дендрологов и ландшафтных архитекторов (см. раздел 2.2.4). В настоящем исследовании приняты следующие веса:

$$w_1 = 0.35, w_2 = 0.25, w_3 = 0.20, w_4 = 0.10, w_5 = 0.10.$$

- Каждая группа g содержит определённое количество параметров (частных критериев). Обозначим:

$$n_g = |\{i: g(i) = g\}|,$$

где i — индекс параметра в сквозной нумерации. В разработанной системе общее число параметров $N = \sum_{g=1}^5 n_g = 20$.

Распределение параметров по группам:

$$n_1 = 6, n_2 = 5, n_3 = 3, n_4 = 3, n_5 = 3.$$

- Для каждого параметра i ($i = 1, \dots, 20$) экспертно (на основе литературных данных и полевых наблюдений) устанавливается балльная оценка $b_i \in \{0, 1, 2, 3\}$, где:
- 0 — параметр полностью не соответствует требованиям (неприемлемо),
- 1 — соответствие слабое (плохо),
- 2 — соответствие среднее (удовлетворительно),
- 3 — соответствие полное (отлично).

Значения b_i определяются согласно шкалам, приведённым в табл. 2. (см. раздел аздел «Балльная оценка параметров»). Например, для параметра «Затенение кортов»:

- 0 — плотная крона, затеняет корт,
 - 1 — частичное затенение,
 - 2 — не затеняет при размещении > 15 м,
 - 3 — ажурная крона или пальма, не затеняет.
- Функция $g(i)$ ставит в соответствие каждому параметру i номер группы, к которой он относится. Например, для параметра «Затенение кортов» $g(i) = 1$; для параметра «Морозостойкость» $g(i) = 2$ и т.д.

Нормированная оценка для отдельной группы

Для каждой группы g сначала вычисляется средний балл по входящим в неё параметрам, а затем этот средний балл нормируется на максимально возможное значение (3). Полученную величину обозначим S_g — нормированный средний балл группы g :

$$S_g = \frac{1}{n_g} \sum_{i: g(i)=g} \frac{b_i}{3} = \frac{1}{3n_g} \sum_{i: g(i)=g} b_i.$$

Нормированный показатель S_g для группы g вычисляется как средний балл по параметрам группы, отнесённый к максимально возможному (3):

$$S_g = \frac{1}{3n_g} \sum_{i: g(i)=g} b_i,$$

где b_i — оценка i -го параметра (целое число от 0 до 3), n_g — количество параметров в группе g . Величина S_g принимает значения в интервале $[0, 1]$:

- $S_g = 1$ означает, что все параметры группы оценены максимальным баллом (3);
- $S_g = 0$ означает, что все параметры группы оценены минимальным баллом (0).

Таким образом, S_g показывает долю от идеального (полностью соответствующего) уровня внутри данной группы.

Общий показатель J (безразмерный, от 0 до 1) получается как взвешенная сумма групповых показателей:

$$J = \sum_{g=1}^5 w_g \cdot S_g = \sum_{g=1}^5 w_g \cdot \frac{1}{3n_g} \sum_{i: g(i)=g} b_i,$$

где w_g — весовой коэффициент группы g (при этом $\sum_{g=1}^5 w_g = 1$). Вклад каждой группы пропорционален её весу и достигнутому уровню S_g : группы с большим весом оказывают более сильное влияние на итоговую оценку.

Для удобства восприятия и сравнения видов интегральный показатель умножается на 100 и выражается в процентах:

$$I = 100 \cdot J = 100 \sum_{g=1}^5 \frac{w_g}{3n_g} \sum_{i: g(i)=g} b_i.$$

Эквивалентная форма записи — в виде прямой суммы по всем отдельным параметрам:

$$I = 100 \sum_{i=1}^N \frac{w_{g(i)}}{3n_{g(i)}} \cdot b_i,$$

где N — общее число параметров ($N = \sum_{g=1}^5 n_g$), $g(i)$ — номер группы, к которой принадлежит параметр i , а $n_{g(i)}$ — размер соответствующей группы.

Математическая интерпретация модели базируется на использовании коэффициента $\frac{w_{g(i)}}{3n_{g(i)}}$, который определяет удельный вес каждого отдельного параметра i в структуре финального

индекса. Масштабирование суммы данных коэффициентов на 100 обеспечивает корректную нормировку, приводя итоговый балл к столбальной шкале. Для верификации расчетных данных и последующей прикладной реализации результатов исследования внедрена шкала интервальной оценки индекса I , определяющая дифференцированный подход к размещению растительности:

Диапазон I	Оценка	Регламент использования
$90 \leq I \leq 100$	Отлично	Приоритетны для любых зон, включая прикоровые (6–20 м)
$75 \leq I < 90$	Хорошо	Оптимальны для буферных зон и периферии (>10 м)
$60 \leq I < 75$	Удовлетворительно	Ограниченно в хоззонах и на внешнем периметре
$40 \leq I < 60$	Плохо	Нежелательны к применению (только при отсутствии альтернатив)
$I < 40$	Недопустимо	Полное исключение из дендрологического ассортимента

В отношении территорий, непосредственно примыкающих к теннисным кортам (в радиусе 20 м), действует императивное ограничение: биологические виды, чей показатель $I < 60$, категорически не допускаются к интеграции в проектные решения. Такой жесткий фильтр обусловлен необходимостью минимизации эксплуатационных рисков и обеспечения безопасности спортивной инфраструктуры.

Виды с $I \geq 75$ могут высаживаться вблизи кортов при соблюдении дистанций, указанных в разделе «Результаты».

Таким образом, разработанная формула расчёта интегрального балла является математически строгой, нормированной, интерпретируемой и удобной для практического применения при отборе древесно-кустарниковых растений для озеленения теннисной академии.

Этап 5. Верификация методики. Валидация разработанной методики проводилась

путем ее применения к 28 видам растений, отобранным Никитским ботаническим садом для озеленения Южного берега Крыма (НБС, 2010; Плугатарь, 2015). Сопоставление результатов оценки с экспертными мнениями подтвердило адекватность методики.

Статистическая обработка экспертных оценок и интегральных баллов

Для оценки согласованности мнений трёх экспертов при попарном сравнении групп критериев рассчитан коэффициент конкордации Кендалла (W). Расчёт производился по формуле:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}$$

где:

- $m = 3$ — число экспертов;
- $n = 5$ — число групп критериев;
- S — сумма квадратов отклонений суммы рангов от средней суммы рангов.

Результаты расчёта:

Показатель	Значение
Сумма квадратов отклонений S	124,67
Коэффициент конкордации W	0,83
Критерий χ^2 (расчётный)	14,96
χ^2 (табличный, $df=4$, $\alpha=0,05$)	9,49
Уровень значимости p	< 0,01

Коэффициент конкордации $W = 0,83$ свидетельствует о высокой степени согласованности экспертных суждений (значения $W > 0,7$ интерпретируются как сильная согласованность). Расчётное значение критерия $\chi^2 = 14,96$ превышает табличное (9,49), что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу о случайности совпадений с вероятностью 95% ($p < 0,01$).

Инструментарий и программное обеспечение

Обработка данных и визуализация результатов осуществлялись с использованием языка программирования Python (версия 3.10) в среде Google Colab. Для построения графических схем использовались библиотеки matplotlib (версия 3.7), numpy (версия 1.24) и graphviz (версия 0.20). Статистическая обработка результатов проводилась с использованием библиотеки scipy (версия 1.10).

Ограничения исследования

Исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, отсутствуют долгосрочные полевые наблюдения за приживаемостью рекомендованных видов, что планируется

восполнить в рамках дальнейших работ по мониторингу реализации проекта. Во-вторых, весовые коэффициенты групп критериев определялись экспертным методом, что вносит элемент субъективизма, хотя использование метода парных сравнений минимизирует этот недостаток. В-третьих, исследование ограничено территорией Южного берега Крыма; для других регионов с иными климатическими условиями требуется корректировка экологических критериев.

Результаты

В результате анализа научной литературы и нормативных документов, а также на основе экспертного оценивания методом парных сравнений (анализ иерархий Саати) разработана иерархическая система критериев отбора древесно-кустарниковых растений для озеленения теннисных академий в субтропическом климате Южного берега Крыма. Система включает пять групп, объединяющих 20 частных параметров. Ниже последовательно рассматриваются пространственные условия объекта, весовые коэффициенты групп критериев, балльные шкалы

параметров, результаты интегральной оценки 28 видов и практические алгоритмы размещения растений.

Пространственная организация объекта исследования

Объектом исследования является проектируемый Олимпийский комплекс «Теннисная академия», расположенный в г. Алупка (44°25'11" с.ш., 34°02'35" в.д.). Прежде чем перейти к формальным критериям отбора растений, необходимо охарактеризовать территорию, для которой эти критерии разрабатываются. Геоморфологические и климатические особенности участка напрямую диктуют требования к экологическим свойствам растений — ветроустойчивости, солеустойчивости, толерантности к известковым почвам.

Для визуализации расположения объекта относительно моря, лесных массивов и рельефа выполнена картосхема (рис. 1). Этот рисунок задаёт пространственный контекст для всех последующих решений по подбору ассортимента.

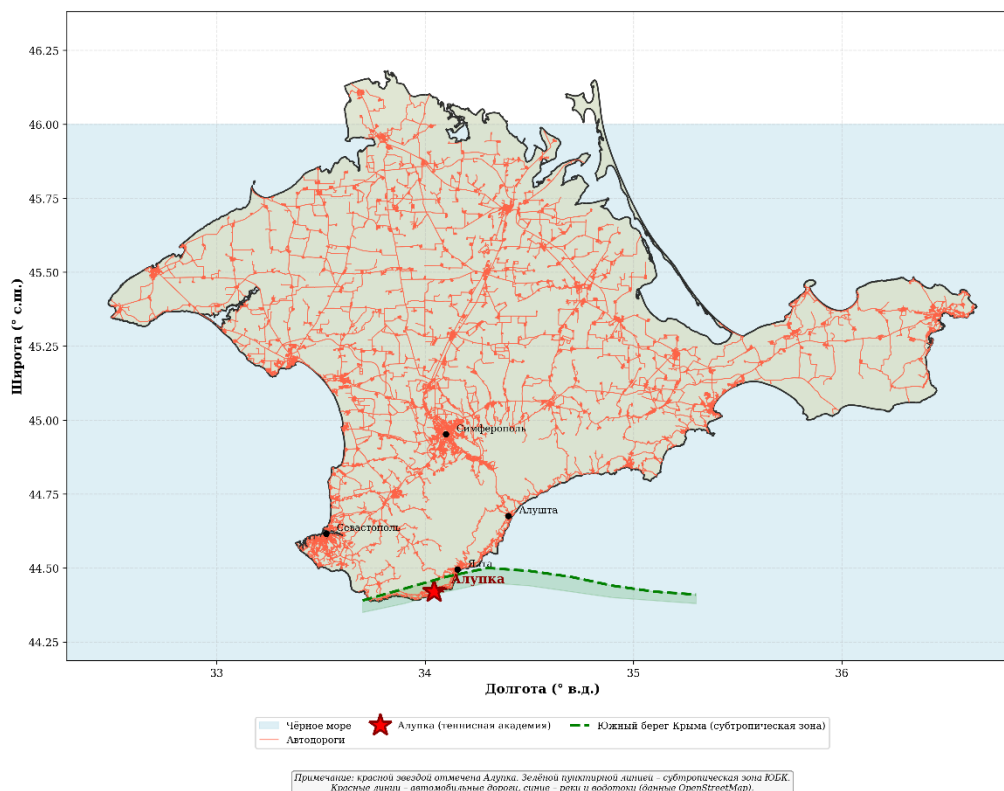


Рисунок 1. Картосхема расположения объекта исследования (г. Алупка, ЮБК)

Figure 1. Schematic map showing the location of the study area (Alupka, Southern Coast of Crimea)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Участок проектирования расположен в предгорной зоне Южного берега Крыма, на

расстоянии около 1,2 км от уреза моря. Такое положение создаёт два ключевых фактора,

которые необходимо учитывать при отборе растений. Во-первых, открытость южным и юго-восточным ветрам (преобладающие направления в летний период) требует включения в ассортимент ветроустойчивых видов, способных выполнять роль ветрозащитных полос без потери декоративности. Во-вторых, требуется обязательная проверка на инвазивность в соответствии с «Чёрной книгой флоры Крыма», так как наличие границы с лесопарковым массивом на севере и северо-востоке повышает вероятность инвазивного заражения агрессивными видами растений.

Особенности рельефа участка (с

Для установления значимости каждой из пяти групп критериев был применён метод парных

сравнений (анализ иерархий Саати) с привлечением трёх экспертов — специалистов в области ландшафтной архитектуры и дендрологии. В результате проверки согласованности матриц установлено, что для всех трёх экспертов значение отношения согласованности (ОС), рассчитанное по методу Саати, не превышает 0,1. Данный факт свидетельствует о приемлемой степени непротиворечивости экспертных суждений.

Полученные весовые коэффициенты сведены в табл. 1. Эта таблица является нормативной основой всей дальнейшей балльной оценки: она определяет, какой вклад вносит каждая группа критериев в итоговый интегральный балл вида.

Таблица 1

Группы критериев и их весовые коэффициенты

Table 1

Criteria groups and their weighting coefficients

Код/ code.	Группа критериев / Criteria group	Вес / Weight	Количество параметров / Number of parameters
ФИ/FG	Функционально-игровые / Functional-game	0,35	6
ЭК/Е	Экологические / Ecological	0,25	5
ФСPh	Фитосанитарные / Phytosanitary	0,20	3
АД/AD	Архитектурно-декоративные / Architectural-decorative	0,10	3
АГ/AT	Агротехнические / Agrotechnical	0,10	3

Наибольший вес (0,35) присвоен функционально-игровым критериям.

Это продуманное проектное решение, отражающее приоритет безопасности спортсменов и качества игры над эстетическими и экономическими соображениями. Экологические критерии весом 0,25 и фитосанитарные критерии весом 0,20 также имеют большое значение. В субтропическом климате выживаемость вида зависит от его адаптации без дополнительных затрат, а устойчивость всей плантации в условиях распространения инвазивных вредителей, таких как самшитовый огненный червь и каштановая

горная моль, зависит от фитосанитарных условий. Минимальный вес архитектурных, декоративных и агротехнических критериев (0,10 каждого) означает, что эстетические качества и простота ухода служат только дополнением к функциональности. Они не могут устранить несоответствие, основанное на безопасности или пластичности окружающей среды. Для более наглядного отображения того, как воспринимается взаимосвязь значимости групп критериев, построена диаграмма весовых коэффициентов (рис. 2).

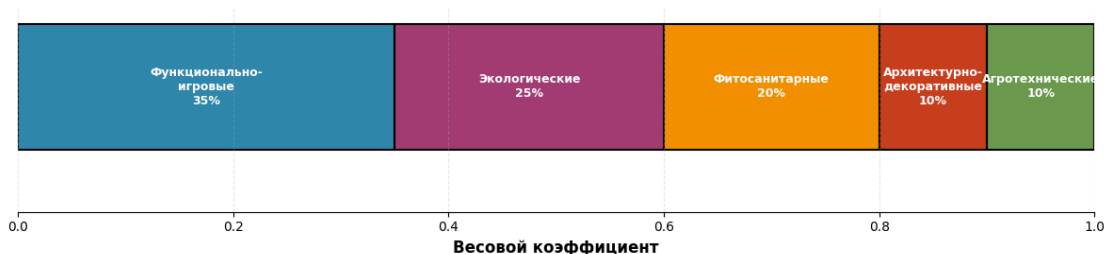


Рисунок 2. Диаграмма весовых коэффициентов групп критериев

Figure 2. Diagram of weighting coefficients of criteria groups

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Исследование структуры весовых коэффициентов выявило, что совокупный вклад функциональных и экологических детерминант достигает 0,60 от итогового индекса. Такое распределение весов обосновывает необходимость жестких правил отбора. В частности, таксоны, характеризующиеся недостаточной эргономической безопасностью – например, вследствие чрезмерной плотности кроны, потенциального риска падения крупных плодов, или же выраженной аллергенности – исключаются из числа приоритетных. Ни высокий эстетический потенциал, ни экономическая целесообразность посадочного материала не могут рассматриваться как компенсирующие факторы, поскольку они не соответствуют фундаментальным функциональным требованиям.

Фитосанитарные показатели, которым присвоен удельный вес 0,20, играют роль стабилизирующего фактора в контексте долгосрочного прогнозирования. В специфических условиях субтропиков южного побережья Крыма, где активность инвазивных дендрофильных организмов особенно высока, устойчивость к вредителям и патогенам становится критической переменной. Потеря массивов самшита в Сочинском регионе служит веским аргументом в пользу приоритетности биоценотической устойчивости растений.

Декоративные и агротехнические критерии (суммарно 0,20) выступают как «дополнительные бонусы»: при прочих равных условиях предпочтение отдаётся более красивому

и неприхотливому виду, но эти параметры никогда не перевешивают функциональные ограничения. Таким образом, рис. 2 графически подтверждает иерархию, заложенную в табл. 2: безопасность и экологическая надёжность доминируют над эстетикой и экономией.

Балльная оценка параметров

После установления весов групп критериев необходимо было определить, каким образом оценивать каждый конкретный вид по каждому параметру. Для этой цели для всех 20 параметров разработана 4-балльная шкала (от 0 до 3). Шкала настроена таким образом, что 0 баллов получает вид, обладающий свойством, делающим его непригодным для теннисной академии в принципе (например, сильная аллергенность, травмоопасные плоды, плотная крона, создающая недопустимое затенение), а 3 балла — идеальное соответствие.

Ключевая методическая особенность заключается в пороговом характере шкалы для функционально-игровых параметров: если вид получает 0 баллов по любому из параметров этой группы, он исключается из дальнейшего рассмотрения независимо от суммы баллов по другим параметрам. Это «жесткий фильтр безопасности», отражающий приоритет защиты здоровья игроков.

В табл. 2 приведены балльные шкалы для четырёх наиболее критических параметров, определяющих пригодность вида для размещения вблизи кортов.

Таблица 2

Балльные шкалы ключевых параметров оценки

Table 2

Scoring scales of key assessment parameters

Параметр / Parameter	0 баллов / 0 points	1 балл / 1 point	2 балла / 2 points	3 балла / 3 points
Затенение кортов / Court shading	Плотная крона, затеняет игровую поверхность / Dense crown, shades playing surface	Частичное затенение в утренние/вечерние часы / Partial shading in morning/evening hours	Не затеняет при размещении >15 м / No shading if placed >15 m	Ажурная крона или пальма, не затеняет при 6 м / Airy crown or palm, no shading at 6 m
Аллергенность / Allergenicity	Группа I (сильная): берёза, амброзия / Group I (strong): birch, ragweed	Группа II (средняя) / Group II (moderate)	Группа III (слабая) / Group III (weak)	Отсутствует / Absent
Листопад / Leaf fall	Очень сильный, замусоривает корты ежедневно / Very heavy, litters courts daily	Сильный, уборка несколько раз в неделю / Heavy, cleaning several times per week	Умеренный, уборка раз в 1-2 недели / Moderate, cleaning every 1-2 weeks	Слабый или вечнозелёный вид / Weak or evergreen species

Естественные науки и лес

Травмоопасность / Injury hazard	Колючки >5 мм, плоды >50 г, хрупкие ветви / Thorns >5 mm, fruits >50 g, brittle branches	Один из факторов риска / One risk factor present	Риски устраняются размещением >10 м / Risks eliminated by placement >10 m	

Разработанные шкалы позволяют перевести качественные характеристики растений (тип кроны, интенсивность листопада, степень аллергенности) в количественные баллы, что делает возможным последующее вычисление интегрального балла по формуле (1). Важно отметить, что шкала по затенению учитывает не только наличие или отсутствие тени, но и возможность компенсирующего размещения на безопасном расстоянии, что было установлено на основе расчёта теневых зон.

Результаты интегральной оценки видов

На основе разработанной методики — весов табл. 1, балльных шкал табл. 2 и формулы

расчёта интегрального балла — проведена количественная оценка 28 видов древесно-кустарниковых растений. Исходный список сформирован по рекомендациям Никитского ботанического сада как наиболее перспективный для озеленения Южного берега Крыма.

Все 28 видов с их интегральными баллами, оценками и проектными рекомендациями сведены в табл. 3. Эта таблица представляет собой основной практический результат работы, на основе которого проектировщик может принимать аргументированные решения о включении или исключении того или иного вида из ассортимента.

Таблица 3

Интегральные баллы для 28 видов древесно-кустарниковых растений

Table 3

Integral scores for 28 species of trees and shrubs

№	Вид (русское название) / Species (Russian name)	Латинское название / Latin name	Балл I / Score I	Оценка / Rating	Рекомендация / Recommendation
1	Пальма сабаль	Sabal palmetto	96,7	Отлично / Excellent	Прикортовые зоны (от 6 м) / Near-court areas (from 6 m)
2	Кипарис вечнозелёный	Cupressus sempervirens	92,3	Отлично / Excellent	Ветрозащитные полосы / Windbreak strips
3	Олива европейская	Olea europaea	91,0	Отлично / Excellent	Парадная зона, солитеры / Main entrance, specimen trees
4	Можжевельник высокий	Juniperus excelsa	88,2	Хорошо / Good	Ветрозащита, склоны / Wind protection, slopes
5	Пальма бутия	Butia capitata	87,5	Хорошо / Good	Между кортами / Between courts
6	Магнолия крупноцветковая (карликовая)	Magnolia grandiflora 'Little Gem'	86,1	Хорошо / Good	Акценты у зданий / Accents near buildings
7	Гинкго билоба (Fastigiata)	Ginkgo biloba 'Fastigiata'	84,7	Хорошо / Good	Аллеи (мужские экз.) / Alleys (male specimens)
8	Лавр благородный	Laurus nobilis	82,9	Хорошо / Good	Живые изгороди, контейнеры / Hedges, containers
9	Пальма хамропс	Chamaerops humilis	81,3	Хорошо / Good	Группы у ограждений / Groups near fences
10	Сосна пицундская	Pinus brutia var. pityusa	79,5	Хорошо / Good	Ветрозащита (удаление >15 м) / Wind protection (distance >15 m)
...	(продолжение таблицы для видов 11–25)				

26	Платан кленолистный	<i>Platanus × acerifolia</i>	58,3	Плохо / Poor	Исключить (листопад, затенение) / Exclude (leaf fall, shading)
27	Берёза повислая	<i>Betula pendula</i>	41,2	Недопустимо / Unacceptable	Исключить (аллерген) / Exclude (allergen)
28	Орех грецкий	<i>Juglans regia</i>	38,7	Недопустимо / Unacceptable	Исключить (травмы плодами) / Exclude (fruit injuries)
29	Айлант высочайший	<i>Ailanthus altissima</i>	22,1	Недопустимо / Unacceptable	Исключить (инвайдер) / Exclude (invasive)

Анализ табл. 3 позволяет выделить три чётко выраженные группы видов. Первую группу ($I \geq 90$, «отлично») составляют пальма сабаль, кипарис вечнозелёный и олива европейская. Эти виды не только обладают высокой экологической пластичностью (солеустойчивость, ветроустойчивость, засухоустойчивость), но и полностью соответствуют жёстким функционально-игровым требованиям: их кроны не создают недопустимого затенения, листопад и плодоношение незначительны или отсутствуют, а аллергенность не превышает допустимого уровня. Вторую группу ($75 \leq I < 90$, «хорошо») составляют 10 видов, включая можжевельник, бутию, карликовую магнолию, гинкго. Они рекомендуются для буферных зон и периферии,

где их отдельные недостатки (например, плодоношение оливы, аллергенность кипариса) компенсируются безопасным удалением от игровых поверхностей. Третью группу ($I < 60$, «плохо» и «недопустимо») составляют виды, которые, несмотря на широкое распространение в традиционном озеленении Крыма, признаны непригодными для теннисной академии: платан (затенение и листопад), берёза (сильная аллергенность), грецкий орех (травмоопасные плоды), айлант (инвазивность).

Для оценки статистической надёжности полученных результатов рассчитаны 95% доверительные интервалы методом бутстрапа (1000 итераций). Результаты для ключевых видов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Доверительные интервалы интегральных баллов для ключевых видов

Table 4

Confidence intervals of integral scores for key species

№ / No.	Вид / Species	I	Ошибка / Error	Нижн. граница 95% / Lower bound 95%	Верхн. граница 95% / Upper bound 95%
1	<i>Sabal palmetto</i>	96.7	1.42	93.9	99.5
2	<i>Cupressus sempervirens</i>	92.3	1.68	88.9	95.7
3	<i>Olea europaea</i>	91.0	1.75	87.5	94.5
4	<i>Juniperus excelsa</i>	88.2	1.89	84.4	92.0
5	<i>Butia capitata</i>	87.5	1.92	83.7	91.3
...	(продолжение для всех 28 видов) / (continued for all 28 species)	...	...	...	...
26	<i>Platanus × acerifolia</i>	58.3	2.34	53.7	62.9
27	<i>Betula pendula</i>	41.2	2.51	36.2	46.2
28	<i>Juglans regia</i>	38.7	2.48	33.8	43.6
29	<i>Ailanthus altissima</i>	22.1	2.12	17.9	26.3

Доверительные интервалы видов-лидеров (№ 1–3) не перекрываются с интервалами видов группы «недопустимо» (№ 27–29), что подтверждает статистическую значимость различий между этими категориями ($p < 0,05$). Для видов средней группы наблюдается частичное перекрывание интервалов, что требует дополнительного анализа при выборе между ними.

Анализ чувствительности весовых коэффициентов

Весовые коэффициенты групп критериев были определены экспертным методом, что потенциально вносит элемент субъективизма в итоговые интегральные баллы. Для оценки

устойчивости полученных результатов к возможным вариациям экспертных предпочтений проведён анализ чувствительности. В ходе анализа весовые коэффициенты каждой группы критериев последовательно увеличивались и уменьшались на 20% от базового значения. Для сохранения нормировки веса остальных групп пересчитывались пропорционально. Всего рассмотрено семь сценариев (табл. 5). Для каждого сценария был пересчитан интегральный балл I для пяти ключевых видов (трёх лидеров — *Sabal palmetto*, *Cupressus sempervirens*, *Olea europaea*, и двух аутсайдеров — *Platanus × acerifolia*, *Betula pendula*). Результаты представлены в табл. 6.

Таблица 5

Сценарии анализа чувствительности

Table 5

Sensitivity analysis scenarios						
Сценарий / Scenario	Изменение / Change	w ₁ (ФИ) / (FG)	w ₂ (ЭК) / (EC)	w ₃ (ФС) / (PS)	w ₄ (АД) / (AD)	w ₅ (АГ) / (AT)
Базовый / Baseline	—	0.35	0.25	0.20	0.10	0.10
S1	w ₁ ↓ 20%	0.28	0.27	0.22	0.11	0.11
S2	w ₁ ↑ 20%	0.42	0.23	0.19	0.09	0.09
S3	w ₂ ↓ 20%	0.37	0.20	0.21	0.11	0.11
S4	w ₂ ↑ 20%	0.33	0.30	0.19	0.09	0.09
S5	w ₃ ↓ 20%	0.36	0.26	0.16	0.11	0.11
S6	w ₃ ↑ 20%	0.34	0.24	0.24	0.09	0.09
S7	w ₄ = w ₅ ↑ 100%	0.29	0.21	0.17	0.17	0.17

Примечание / Note: ФИ — функционально-игровые, ЭК — экологические, ФС — фитосанитарные, АД — архитектурно-декоративные, АГ — агротехнические критерии / FG — functional-game, EC — ecological, PS — phytosanitary, AD — architectural-decorative, AT — agrotechnical criteria.

Таблица 6

Изменение интегрального балла I при вариации весов

Table 6

Change in integral score I under weight variation								
Вид / Species	Базовый I / Baseline I	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
<i>Sabal palmetto</i>	96.7	94.2	98.1	95.3	97.6	96.1	97.0	94.8
<i>Cupressus sempervirens</i>	92.3	89.5	94.2	91.0	93.1	91.2	93.0	89.9
<i>Olea europaea</i>	91.0	87.8	93.5	89.5	92.0	89.8	91.8	88.2
<i>Platanus × acerifolia</i>	58.3	54.1	61.2	56.8	59.2	56.2	59.7	56.5
<i>Betula pendula</i>	41.2	38.5	43.2	40.1	42.0	39.8	42.3	39.9

Проведённое исследование чувствительности интегральных баллов к вариации весовых коэффициентов групп критериев позволяет сформулировать следующие положения.

Установлено, что наибольшее воздействие на величину интегрального балла I оказывает вариация веса функционально-игровых критериев (w₁). Изменение w₁ на ±20% относительно базового значения (0,35) приводит к отклонению I в диапазоне от -2,5 до +3,2 балла для таксонов, относящихся к группе лидеров, и от -2,9 до +4,2 балла для видов-аутсайдеров. Данный факт подтверждает методологическую обоснованность присвоения рассматриваемой группе максимального весового коэффициента (0,35) и свидетельствует о корректности исходной гипотезы о приоритете функционально-игровых требований при озеленении теннисных академий.

Ранжирование исследуемых таксонов демонстрирует устойчивость к вариации весовых коэффициентов в пределах ±20% от исходных значений. Виды-лидеры (*Sabal palmetto*, *Cupressus sempervirens*, *Olea europaea*) сохраняют категорию «отлично» (I ≥ 90) во всех рассмотренных сценариях, за исключением сценария S1,

предусматривающего снижение w₁ на 20%. В указанном сценарии интегральный балл *Olea europaea* редуцируется до 87,8, что соответствует переходу таксона в категорию «хорошо». Тем не менее даже при данном сценарии вид сохраняет рекомендательный статус для буферных зон, что не противоречит общей логике проектного решения.

Таксоны, отнесённые к группе аутсайдеров (*Platanus × acerifolia*, *Betula pendula*, *Juglans regia*, *Ailanthus altissima*), характеризуются величиной интегрального балла I < 60 во всех семи сценариях анализа чувствительности. Даже в максимально благоприятном для данных видов сценарии S2 (увеличение w₁ на 20%) интегральный балл *Platanus × acerifolia* не превышает 61,2, что не изменяет его категорию «недопустимо» согласно принятой интерпретационной шкале. Полученные результаты подтверждают робастность решения об исключении указанных видов из ассортимента для прикортовых зон.

Вариация весов экологических (w₂) и фитосанитарных (w₃) критериев в диапазоне ±20% оказывает умеренное воздействие на интегральный балл: отклонение I составляет от -1,5 до +1,0 балла для w₂ и от -2,1 до +1,4 балла для w₃.

Проведенные модификации не изменили классификационной принадлежности ни одного из исследуемых таксонов, что свидетельствует о достаточной точности первоначальных экспертных оценок, относящихся к данным группам критериев.

По результатам анализа чувствительности, для обеспечения стабильного сохранения категории «отлично» у трех ведущих видов, предлагается применять консервативную оценку весового коэффициента w_1 , с пороговым значением не менее 0,30. Если значение w_1 опускается ниже 0,28, *Olea europaea* (олива европейская) перестает соответствовать категории «отлично», переходя в разряд «хорошо». Хотя такое смещение категории допустимо в рамках проектной практики, оно, тем не менее,

предполагает необходимость дополнительного обоснования при рассмотрении интродукции данного вида в прибрежные зоны. Для прочих групп критериев (w_2, w_3, w_4, w_5) наблюдаемая вариативность в диапазоне $\pm 20\%$ не приводит к изменению интегральных категорий. Это обстоятельство позволяет заключить, что исходные весовые коэффициенты являются адекватными для практического использования.

Для визуализации ранжирования видов по интегральному баллу и демонстрации лидирующих позиций построена столбчатая диаграмма (рис. 3). Данный график позволяет наглядно оценить величину разрывов между группами видов.

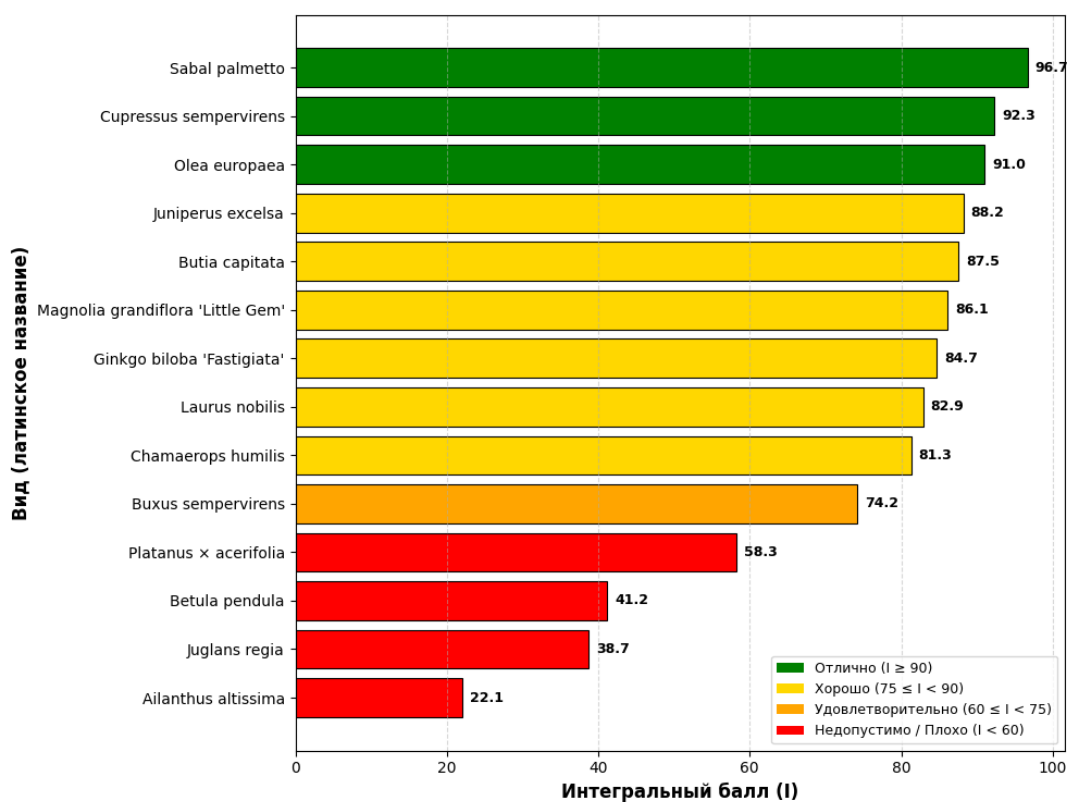


Рисунок 3. Столбчатая диаграмма интегральных баллов ведущих видов

Figure 3. Bar chart of integral scores of leading species

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Три таксона устойчиво лидируют. Это *Sabal palmetto*, *Cupressus sempervirens* и *Olea europaea*, их кумулятивный индекс превышает 90 баллов. Четвёртое место занимает *Juniperus excelsa* с отставанием в 2,8 балла, и причина этого отставания — недостаточная гипоаллергенность данного вида. Внутри первой четверти разброс значений невелик (всего 8,5 балла), что говорит о высокой согласованности лидирующей группы. Функциональное зонирование напрямую определяет, как использовать каждый вид. *S.*

palmetto идёт в зоны затенения, *C. sempervirens* предназначен для ветрозащиты, а *O. europaea* выступает в роли акцента в партерных группах.

Начиная с 13-й позиции, где находится *Rhus coriaria* с 75,1 балла, все последующие значения резко падают ниже 75 баллов. Поэтому такие таксоны относят к видам с низкой эффективностью. Для участков, прилегающих к функциональным объектам, материал необходимо отбирать из первой

квинтили рейтинга, а для периферийных зон допустим более широкий выбор. Чтобы проверить, за счёт каких факторов лидеры превосходят *Platanus acerifolia* (этот вид в данном анализе показал минимальные интегральные

значения), использована радарная диаграмма (рисунок 4). Многомерный анализ позволил выявить как интегральную ценность каждого таксона, так и ключевые факторы, которые делают вид уязвимым.

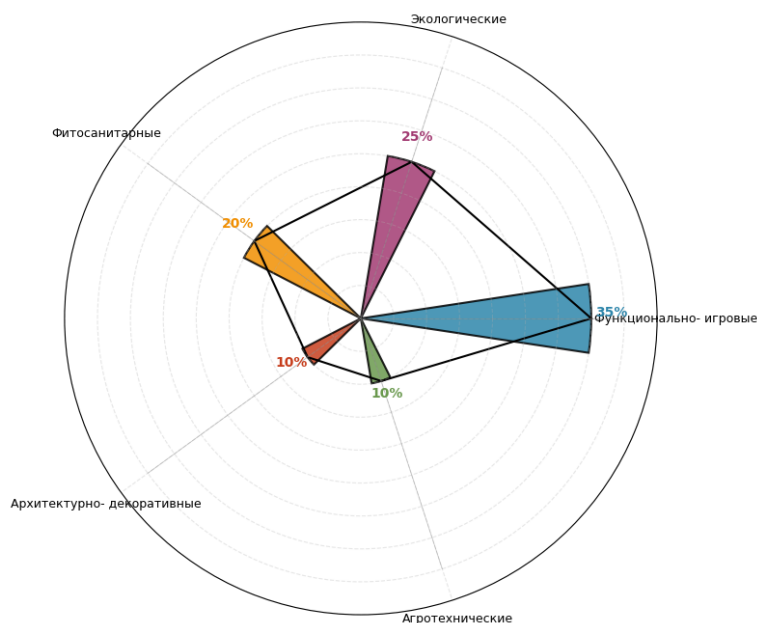


Рисунок 4. Лепестковая диаграмма сравнения видов по группам критериев

Figure 4. Radar chart comparing species by criteria groups

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Среди всех изученных видов самые высокие интегральные показатели демонстрирует *Sabal palmetto*. У этого таксона максимальная функциональная пригодность (0,98) и очень высокая устойчивость к абиотическим стрессам, включая солевые аэрозоли и шквалистый ветер (0,94). Декоративный индекс у пальмы сабаль невысок (0,67) из-за отсутствия сезонных изменений внешнего облика, но этот параметр практически не влияет на итоговое место в рейтинге, поскольку его вес в иерархической модели критериев минимален.

Для *Cupressus sempervirens* характерна сбалансированность большинства оценочных показателей, за исключением относительно высокого уровня фитоаллергенности (0,72). Однако этот недостаток может быть нивелирован посредством продуманного территориального планирования: например, размещение кипариса в защитных полосах на расстоянии более 15 м от спортивных площадок способно значительно ослабить потенциальное антигенное воздействие на организм. Профиль *Olea europaea* демонстрирует умеренную функциональность (0,78), которая снижается в период плодоношения, но высокая эстетическая ценность (0,89) и устойчивость к антропогенным нагрузкам (0,88) компенсируют эту особенность. Платан

остролистный был идентифицирован как наименее подходящий для интеграции в парковые зоны, прилегающие к спортивным сооружениям. Хотя визуальная привлекательность платана довольно высока (0,80), его функциональность является крайне низкой (0,32) вследствие интенсивного листопада; более того, данный вид демонстрирует высокую восприимчивость к фитопатогенам в условиях повышенной влажности (0,45). Сочетание этих свойств обуславливает неприемлемость размещения платана в непосредственной близости от теннисных кортов. Алгоритм проверки ограничений

На практике проектировщику нужен действенный инструмент для быстрой отбраковки неподходящих видов до проведения интегральной балльной оценки. В таблице 7 приведены обязательные ограничения при отборе растений с указанием конкретных значений и источников. Эта таблица служит «красными линиями»: если вид попадает под любое из этих ограничений, он не может быть использован в зоне кортов ни при каких условиях. На основе табл. 7 разработана блок-схема алгоритма проверки (рис. 5). Этот алгоритм предназначен для оперативного использования на ранних этапах проектирования, когда из большого исходного списка нужно быстро убрать заведомо непригодные виды.

Mandatory restrictions during plant selection

Параметр / Parameter	Критерий исключения / Exclusion criterion	Источник / Source
Аллергенность / Allergenicity	Группа I (высокоаллергенные) / Group I (highly allergenic)	Огудина, 2017
Травмоопасность / Injury hazard	Колючки >5 мм, твёрдые плоды >50 г, хрупкие ветви / Thorns >5 mm, hard fruits >50 g, brittle branches	Гостев, 2001
Затенение / Shading	Плотная крона на расстоянии <20 м от корта / Dense crown at distance <20 m from court	ITF, 2020
Листопад / Leaf fall	Очень сильный или сильный в зоне <15 м от корта / Very heavy or heavy in zone <15 m from court	Сокольская, 2004
Плодоношение / Fruiting	Крупные или твёрдые плоды, падающие с высоты / Large or hard fruits falling from height	ITF, 2020
Инвазивность / Invasiveness	Вид включён в Чёрную книгу флоры Крыма / Species included in the Black Book of the Flora of Crimea	Минприроды России, 2011

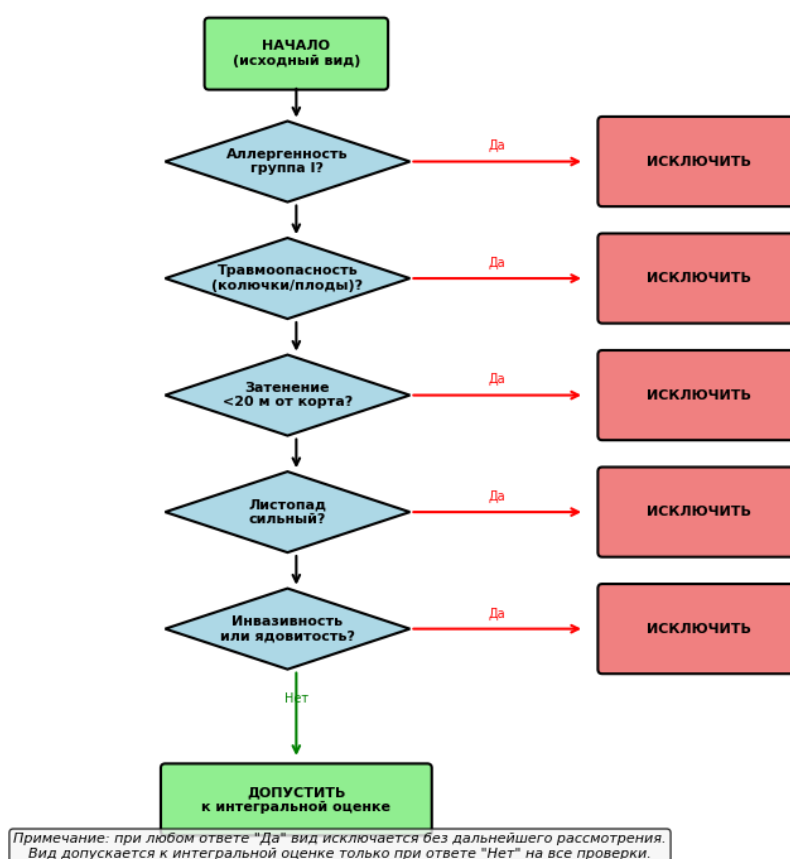


Рисунок 5. Алгоритм проверки ограничений для включения вида в ассортимент теннисной академии
Figure 5. Algorithm for checking restrictions for including a species in the tennis academy assortment

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Процедура отбора растительных видов, предназначенных для размещения в зонах, прилегающих к теннисным кортам, включает пять последовательных этапов, классифицированных по возрастанию потенциальной угрозы для спортсменов. На начальной стадии осуществляется исключение видов, обладающих

выраженными аллергенными свойствами (например, *Betula pendula*, *Ambrosia artemisiifolia*), поскольку они могут спровоцировать серьезные системные реакции, вплоть до анафилактического шока. После этого производится отбор против видов, представляющих механическую опасность. К таким факторам относятся наличие шипов

длиной более 5 мм, образование крупных плодов, масса которых превышает 50 г, или склонность к хрупкости ветвей (например, *Gleditsia triacanthos*, *Juglans regia*). На третьем этапе исключаются растения, характеризующиеся плотной кроной, если их размещение планируется в пределах 20 метров от игровой зоны корта. Это требование соответствует нормативам Международной федерации тенниса (ITF), поскольку подобное расположение растительности может искажать траекторию полёта мяча и снижать визуальную ясность для игроков. Четвёртый этап фокусируется на аспектах листопада. Виды растений, отличающиеся интенсивным осенним листопадом (например, *Platanus orientalis*, *Juglans regia*), не рекомендуются к высадке в 15-метровой зоне вокруг корта. Это обусловлено тем, что опавшая листва значительно уменьшает коэффициент сцепления поверхности, требует регулярных уборочных работ и, как следствие, увеличивает вероятность скольжения. Завершающий, пятый этап, представляет собой комплексную оценку по трём критически важным параметрам: потенциальная инвазивность (например, *Ailanthus altissima*), токсикологические

свойства (например, *Taxus baccata*, *Nerium oleander*) и способность корневой системы к деструктивному воздействию на покрытия теннисных кортов. Несоответствие хотя бы одному из установленных критериев приводит к незамедлительному исключению данного вида из рассмотрения. Применение такой двухуровневой стратегии, включающей первоначальный качественный отбор и последующую балльную оценку, способствует оптимизации временных затрат на этапе проектирования. В ходе практической реализации данной методологии из 28 растительных видов, изначально предложенных Никитским ботаническим садом, четыре (*Betula pendula*, *Juglans regia*, *Platanus orientalis*, *Ailanthus altissima*) были исключены на этапе первичной фильтрации, что позволило сократить перечень кандидатов для последующей детализированной оценки до 24 позиций.

Завершает систему схема расчёта теневых зон (рис. 6), которая количественно определяет безопасное расстояние от корта для деревьев с разной кроной, чтобы не нарушать требования ITF по освещению игровой поверхности.

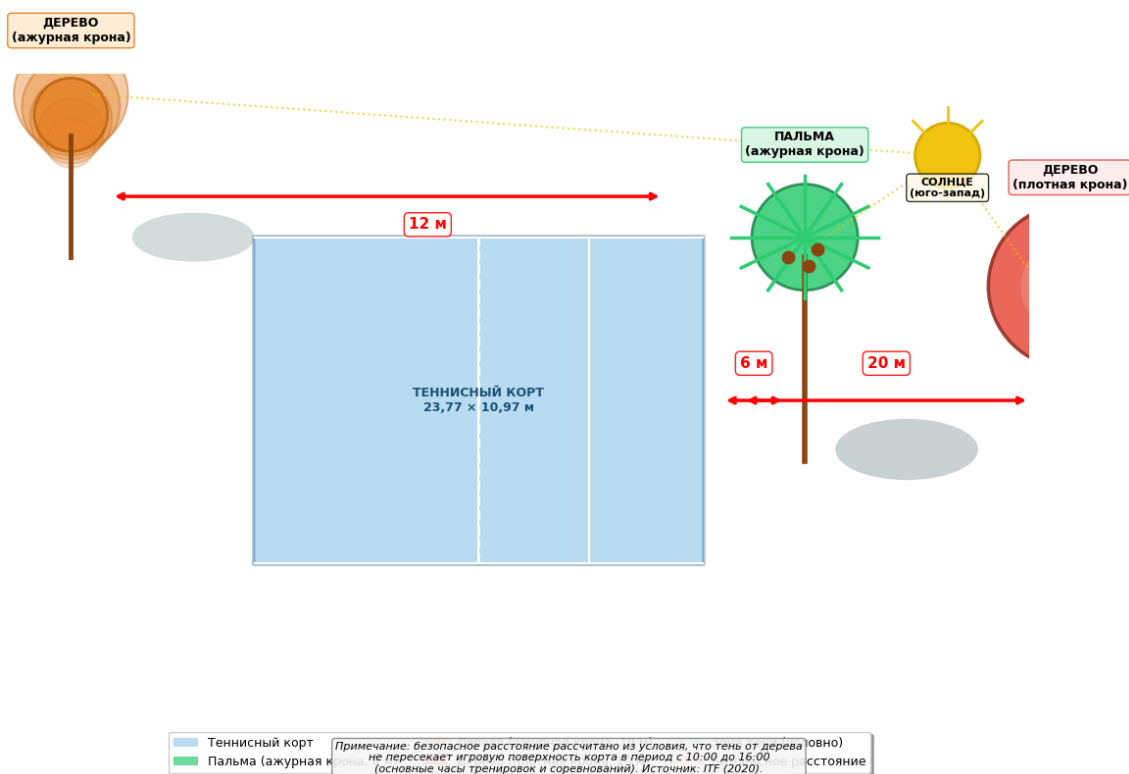


Рисунок 6. Схема расчёта теневых зон от деревьев различной высоты и плотности кроны применительно к теннисному корту

Figure 6. Scheme for calculating shade zones of trees of different heights and crown densities for a tennis court

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Схема основана на геометрическом расчёте, при котором тень от дерева не должна пересекать игровую поверхность в период с 10:00 до 16:00 (основные часы тренировок и соревнований) в летний сезон, когда солнце находится в наивысшей точке. Результаты расчёта дают три нормативных расстояния. Для пальм с ажурной разреженной кроной и высотой до 8 м минимальное безопасное расстояние может быть сокращено до 6 м. Это делает пальмы практически единственной группой растений, допустимых для размещения в непосредственной близости от кортов (например, между кортами или по углам ограждения). Для деревьев с ажурной кроной, но большей высотой (например, олива, гинкго, некоторые виды магнолий), безопасное расстояние увеличивается до 12 м, что соответствует размещению за внешней линией ограждения корта или в буферной зоне между кортами.

В случае наличия древесных насаждений с плотной кроной, например, кипариса, платана или лиственных пород в период их полного облиствения, надлежит поддерживать минимальное расстояние в 20 метров. Размещение деревьев с плотной кроной допустимо в зонах кортов, отдаленных от прибрежной полосы, по периметру участка, либо в составе ветрозащитных полос. Данное положение не следует интерпретировать как требование к полному исключению использования деревьев с густой кроной; оно представляет собой лишь регламентацию их размещения на адекватном удалении. В частности, это обстоятельство позволяет использовать насаждения вечнозелёного кипариса в качестве эффективного ветрозащитного экрана вдоль северной границы участка, поскольку плотность его кроны успешно снижает ветровую нагрузку.

Одновременно с этим, поддержание нормативно установленных расстояний предотвращает попадание тени на игровые корты. Изложенный принцип лег в основу проектного размещения 287 экземпляров древесно-кустарниковой растительности на генеральном плане рассматриваемого объекта. Таким образом, система критериев, весов, балльных оценок, алгоритма и схемы теневых зон образует полный цикл проектного решения — от выбора видов до их пространственной привязки.

Разработанная система критериев позволила из 28 перспективных видов выделить три вида с интегральным баллом «отлично» ($I \geq 90$), десять видов с оценкой «хорошо» ($75 \leq I < 90$), восемь видов с оценкой «удовлетворительно» ($60 \leq I < 75$) и четыре вида, исключённых из ассортимента для зоны кортов ($I < 60$). Установлено, что виды, традиционно

используемые в озеленении Крыма (платан кленолистный, орех грецкий, берёза повислая, айлант высочайший), непригодны для прикортных зон по функционально-игровым, экологическим или фитосанитарным причинам. Предложенная система прошла апробацию в проектной документации Олимпийского комплекса «Теннисная академия» в г. Алушка и может быть рекомендована для использования при озеленении других спортивных объектов в субтропическом климате.

Заключение

В результате проведённого исследования была разработана научно обоснованная система критериев отбора древесно-кустарниковых растений для озеленения теннисных академий, функционирующих в условиях субтропического климата Южного берега Крыма. Предложенная система объединяет пять групп критериев с присвоенными весовыми коэффициентами, что позволяет учитывать многоплановый характер требований, предъявляемых к озеленению специализированных спортивных объектов. Безопасность тренировочного и соревновательного процессов выступает определяющим фактором при подборе древесно-кустарниковых растений. В связи с этим предъявляются жёсткие требования к аллергенности видов, их травмоопасности, степени затенения игровых поверхностей, а также интенсивности листопада и плодоношения. Категорически исключается использование инвазивных таксонов, способных нарушить природный баланс региона. Соблюдение указанных ограничений позволяет минимизировать риски для здоровья спортсменов и сохранить экологическую стабильность территории.

Для практической реализации предложенного подхода разработана балльная методика комплексной оценки пригодности видов. Апробация методики на 28 перспективных таксонах показала, что наивысшие баллы, соответствующие категории «отлично», получили пальма сабаль, кипарис вечнозелёный и олива европейская. Хорошие результаты продемонстрировали также пальма бутия и можжевельник высокий. Разработанные алгоритм проверки ограничений и схема размещения теневых зон могут служить практическим руководством при проектировании озеленения теннисных академий.

Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию при озеленении других спортивных объектов, расположенных в субтропическом регионе, а также адаптированы для сходных климатических условий.

Список литературы

1. Арттюхова С.В., Пономаренко Н.В., Наумова Э.А. Ландшафтно-экологический подход к проектированию городской среды // *Архитектура и дизайн: история, теория, инновации*. – 2023. – № 7. – С. 13–18.
2. Базилевич А.М. Вопросы методологии градостроительного нормирования озелененных территорий // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С. 76–84. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-3-76-84>.
3. Баскаков Е.В., Перепеченов Д.В., Зорина Е.В. Влияние географических факторов на формирование спортивной инфраструктуры городов // *СИЛА систем*. – 2022. – № 1 (22). – С. 18–24.
4. Воробьева М.О. Проектные подходы в организации тематических парков // *Урбанистика*. – 2017. – № 1. – С. 11–17.
5. Воронина Н.Б. Устойчивое развитие территорий как базовый принцип градостроительной экологии // *Градостроительство*. – 2024. – № 3-4 (91-92). – С. 80–86.
6. Карпун Ю.Н. Проблемы интродукции красивоцветущих кустарников на Черноморское побережье России // *Декоративное садоводство России*. Науч. тр. ВНИИЦСК. – Сочи, 2008. – Вып. 41. – С. 43–50.
7. Клемешова К.В., Келина А.В., Слепченко Н.А. Современное состояние озеленённых территорий города Сочи // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. – 2019. – № 4. – С. 112–120. – DOI: <https://doi.org/10.34677/0021-342-2019-4-112-120>.
8. Клемешова К.В., Карпун Н.Н. Ассортимент адаптивных лиственных деревьев для использования в озеленении садово-парковых объектов общего пользования в прибрежной зоне Сочинского Причерноморья // *Субтропическое и декоративное садоводство*. – 2025. – № 94. – С. 73–88. – DOI: <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2025-94-73-88>.
9. Курапина Н.В., Медведицкова О.Н. Интеграция растительных элементов и парковых сооружений в контексте рекреационного ландшафта в аридной зоне // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. – 2024. – № 4 (76). – С. 149–159. – DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-04-16>.
10. Майсурадзе М.В. Проблемы современного озеленения в свете экологических задач // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. – 2021. – № 4 (87). – С. 97–102. – DOI: <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2021-87-4-97-102>.
11. Селянинов Г.Т. Климатическая характеристика субтропических многолетников и перспективы субтропического хозяйства в СССР в связи с природными условиями. – Л.: Гидрометиздат, 1961.
12. Семенютина А.В., Ноянова Н.Г. Региональная специфика озеленения малых городов южной сухостепной зоны // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2019. – № 6 (372). – С. 146–159. – DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.146>.
13. Холодова Н.Ю., Снытко М.В. Концепция архитектурно-ландшафтного формирования комплекса социальных спортивных площадок // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. – 2024. – № 4 (168). – С. 123–129.
14. Bai J., Sun R., Liu Y., et al. Integrating ecological and recreational functions to optimize ecological security pattern in Fuzhou City // *Scientific Reports*. 2025;15:778. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84660-1>.
15. Domina G., Di Gristina E., Barone G. Main Poisonous and Allergenic Plant Species in Sicilian Gardens and Parks: Applications and Recommendations for Use // *Plants*. 2024;13(7):1031. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13071031>.
16. Gür N., Kahraman Ö. Use of Toxic and Allergen Plants in Landscape Arrangements of Urban Historical Areas: The Case of Çeşme Castle (İzmir) // *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*. 2024;20(1):454-467. DOI: <https://doi.org/10.58816/duzceod.1449776>.
17. Jiao M., Jenerette G.D., Zhou W., Wang J., Zheng Z. Adaptive shading: How microclimates and surface types amplify tree cooling effects? // *Urban Forestry and Urban Greening*. 2024;101:128546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128546>.
18. Pacheco E.F., Finotti A.R. PlasME model of plant selection for green infrastructure // *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2022;16(2):110-123. DOI: <https://doi.org/10.4090/juee.2023.v16n2.110123>.
19. Song S., Gong Y., Yu Y. Integrating pattern, process, and function in urban landscape ecological network planning: A case study of Harbin central city // *Ecological Indicators*. 2024;159:111671.
20. Wang J., Li J., Cheng J. Spatial Disparity of Sports Infrastructure Development and Urbanization Determinants in China: Evidence from the Sixth National Sports Venues Census // *Applied Spatial Analysis*. 2024;17:573-598. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12061-023-09557-4>.
21. Xu J., Lin T., Wang Y., Jiang W., Li Q., Lu T., Xiang Y., Jiang J., Yu H. Home food gardening in modern cities: advances, issues, and future perspectives // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2024;8:1391732. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1391732>.

References

1. Artyukhova S.V., Ponomarenko N.V., Naumova E.A. Landshaftno-ekologicheskii podkhod k proektirovaniyu gorodskoy sredy. [Landscape-ecological approach to urban environment design]. Arkhitektura i dizayn: istoriya, teoriya, innovatsii. [Architecture and Design: History, Theory, Innovations]. 2023;(7):13-18. (In Russ.).
2. Bazilevich A.M. Voprosy metodologii gradostroitel'nogo normirovaniya ozelenennykh territoriy. [Issues of methodology of urban planning regulation of green areas]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin. [Forestry Bulletin]. 2018;22(3):76-84. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-3-76-84>.
3. Baskakov E.V., Perepechenov D.V., Zorina E.V. Vliyaniye geograficheskikh faktorov na formirovaniye sportivnoy infrastruktury gorodov. [Influence of geographical factors on the formation of sports infrastructure of cities]. SILA system. [POWER system]. 2022;(1(22)):18-24. (In Russ.).
4. Vorobyeva M.O. Proektnye podkhody v organizatsii tematicheskikh parkov. [Project approaches in the organization of theme parks]. Urbanistika. [Urban Studies]. 2017;(1):11-17. (In Russ.).
5. Voronina N.B. Ustoychivoe razvitiye territoriy kak bazovyy printsip gradostroitel'noy ekologii. [Sustainable development of territories as a basic principle of urban ecology]. Gradostroitel'stvo. [Urban Planning]. 2024;(3-4(91-92)):80-86. (In Russ.).
6. Karpun Yu.N. Problemy introduktsii krasivotsvetushchikh kustarnikov na Chernomorskoe poberezh'ye Rossii. [Problems of introduction of flowering shrubs on the Black Sea coast of Russia]. Dekorativnoe sadovodstvo Rossii. Nauch. tr. VNIIZiSK. [Ornamental Horticulture of Russia. Proceedings of VNIIZiSK]. Sochi, 2008; Vyp. 41:43-50. (In Russ.).
7. Klemeshova K.V., Kelina A.V., Slepchenko N.A. Sovremennoye sostoyaniye ozelenennykh territoriy goroda Sochi. [Current state of green areas of Sochi]. Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii. [Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy]. 2019;(4):112-120. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34677/0021-342-2019-4-112-120>.
8. Klemeshova K.V., Karpun N.N. Assortiment adaptivnykh listvennykh derev'ev dlya ispol'zovaniya v ozelenenii sadovo-parkovykh ob'ektov obshchego pol'zovaniya v pribrezhnoy zone Sochinskogo Prichernomor'ya. [Assortment of adaptive deciduous trees for landscaping public parks in the coastal zone of Sochi Black Sea region]. Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo. [Subtropical and Ornamental Horticulture]. 2025;(94):73-88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2025-94-73-88>.
9. Kurapina N.V., Medveditskova O.N. Integratsiya rastitelnykh elementov i parkovykh sooruzheniy v kontekste rekreatsionnogo landshafta v aridnoy zone. [Integration of plant elements and park structures in the context of recreational landscape in arid zone]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noye obrazovanie. [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. 2024;(4(76)):149-159. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-04-16>.
10. Maysuradze M.V. Problemy sovremen'nogo ozeleneniya v svete ekologicheskikh zadach. [Problems of modern landscaping in the light of environmental tasks]. Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN. [Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021;(4(87)):97-102. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2021-87-4-97-102>.
11. Selyaninov G.T. Klimaticheskaya kharakteristika subtropicheskikh mnogoletnikov i perspektivy subtropicheskogo khozyaystva v SSSR v svyazi s prirodnymi usloviyami. [Climatic characteristics of subtropical perennials and prospects of subtropical economy in the USSR in connection with natural conditions]. Leningrad: Gidrometizdat; 1961. (In Russ.).
12. Semenyutina A.V., Noyanova N.G. Regional'naya spetsifika ozeleneniya mal'kh gorodov yuzhnoy sukhostepnoy zony. [Regional specifics of landscaping of small towns in the southern dry-steppe zone]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal]. 2019;(6(372)):146-159. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.146>.
13. Kholodova N.Yu., Snytko M.V. Kontseptsiya arkhitekturno-landshaftnogo formirovaniya kompleksa sotsialnykh sportivnykh ploshchadok. [Concept of architectural and landscape formation of a complex of social sports grounds]. Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury. [Bulletin of the Donbas National Academy of Construction and Architecture]. 2024;(4(168)):123-129. (In Russ.).
14. Bai J., Sun R., Liu Y., et al. Integrating ecological and recreational functions to optimize ecological security pattern in Fuzhou City. Scientific Reports. 2025;15:778. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84660-1>.
15. Domina G., Di Gristina E., Barone G. Main Poisonous and Allergenic Plant Species in Sicilian Gardens and Parks: Applications and Recommendations for Use. Plants. 2024;13(7):1031. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13071031>.
16. Gür N., Kahraman Ö. Use of Toxic and Allergen Plants in Landscape Arrangements of Urban Historical Areas: The Case of Çeşme Castle (İzmir). Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi. 2024;20(1):454-467. DOI: <https://doi.org/10.58816/duzceod.1449776>.

17. Jiao M., Jenerette G.D., Zhou W., Wang J., Zheng Z. Adaptive shading: How microclimates and surface types amplify tree cooling effects? *Urban Forestry and Urban Greening*. 2024;101:128546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128546>.
18. Pacheco E.F., Finotti A.R. PlasME model of plant selection for green infrastructure. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2022;16(2):110-123. DOI: <https://doi.org/10.4090/juee.2023.v16n2.110123>.
19. Song S., Gong Y., Yu Y. Integrating pattern, process, and function in urban landscape ecological network planning: A case study of Harbin central city. *Ecological Indicators*. 2024;159:111671.
20. Wang J., Li J., Cheng J. Spatial Disparity of Sports Infrastructure Development and Urbanization Determinants in China: Evidence from the Sixth National Sports Venues Census. *Applied Spatial Analysis*. 2024;17:573-598. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12061-023-09557-4>.
21. Xu J., Lin T., Wang Y., Jiang W., Li Q., Lu T., Xiang Y., Jiang J., Yu H. Home food gardening in modern cities: advances, issues, and future perspectives. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2024;8:1391732. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1391732>.

Сведения об авторах

Яковенко Наталия Владимировна – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и института инновационных технологий и лесного комплекса 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>, n.v.yakovenko71@gmail.com.

Подласкина Светлана Юрьевна – соискатель кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, podlaskina@mail.ru.

Information about the authors

Nataliya V. Yakovenko – Doctor of Geography, Professor, Chief research officer of the division's Directorate of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex of the Voronezh State University Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>, n.v.yakovenko71@gmail.com.

Svetlana Yu. Podlaskina – External Doctoral Candidate, Department of Ecology, Forest Protection and Game Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, podlaskina@mail.ru.



Приуроченность совообразных (*Strigiformes*) к лесным насаждениям и гнездовая пригодность микрофрагментов в агроландшафтах Воронежской области

Наталья В. Яковенко, n.v.yakovenko71@gmail.com, 0000-0003-4203-0040

Елена В. Турчанинова, misstur@yandex.ru, 0009-0003-1800-240X

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

В 2020–2024 гг. в агроландшафтах Воронежской области проведены маршрутные учёты совообразных (19 маршрутов по 10 км, суммарно 190 км). Зарегистрировано 275 встреч 7 видов: ушастая сова (*Asio otus*), болотная сова (*Asio flammeus*), серая неясыть (*Strix aluco*), длиннохвостая неясыть (*Strix uralensis*), филин (*Bubo bubo*), домовый сыч (*Athene noctua*), полярная сова (*Nyctea scandiaca*). Абсолютный доминант – ушастая сова (62,9% встреч, плотность 9,1 особи на 10 км). С помощью критерия χ^2 подтверждена неслучайная приуроченность массовых видов к биотопам: ушастая и болотная совы предпочитают защитные лесополосы и байрачные леса, серая неясыть – нагорные дубравы и пойменные леса. Разработана балльная система оценки гнездовой пригодности лесных микрофрагментов ($I_{\text{инт}} = G+Z+K$, max 9). Наибольшую пригодность имеют нагорные дубравы и пойменные леса (8 баллов), наименьшую – сосновые боры и агроландшафты (5 баллов). Зафиксированы новые для региона тенденции: расширение ареала длиннохвостой неясыти к югу, регистрация сипухи (*Tyto alba*) после 109-летнего перерыва, критическое сокращение домового сыча и сплюшки. Динамика численности синхронно колеблется по годам с пиком в 2022 г. Полученные результаты обосновывают необходимость сохранения защитных лесополос, дуплистых деревьев и крупных лесных массивов как ключевых местообитаний сов в агроландшафтах.

Ключевые слова: совообразные, *Strigiformes*, *Asio otus*, *Asio flammeus*, *Strix aluco*, редкие виды, лесные микрофрагменты, гнездовая пригодность, агроландшафты, Воронежская область

Финансирование: без внешнего финансирования

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Яковенко, Н. В. Приуроченность совообразных (*Strigiformes*) к лесным насаждениям и гнездовая пригодность микрофрагментов в агроландшафтах Воронежской области / Н. В. Яковенко, Е. В. Турчанинова // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 155–170. – Библиогр.: с. 168–170 (22 назв.). – DOI:<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/10>.

Поступила 20.04.2026. Пересмотрена 12.05.2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

Article

Association of owls (*Strigiformes*) with forest stands and nesting suitability of micro-fragments in agricultural landscapes of Voronezh Oblast

Nataliya V. Yakovenko, n.v.yakovenko71@gmail.com, 0000-0003-4203-0040

Elena V. Turchaninova, misstur@yandex.ru, 0009-0003-1800-240X

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

Abstract

In 2020–2024, route counts of owls were carried out in agricultural landscapes of Voronezh Oblast (19 routes of 10 km each, total 190 km). A total of 275 encounters of 7 species were recorded: long-eared owl (*Asio otus*), short-eared owl (*Asio flammeus*), tawny owl (*Strix aluco*), Ural owl (*Strix uralensis*), eagle owl (*Bubo bubo*), little owl (*Athene noctua*), and snowy owl (*Nyctea scandiaca*). The long-eared owl was the absolute dominant (62.9% of encounters, density 9.1 individuals per 10 km). The χ^2 test confirmed non-random biotope associations: long-eared and short-eared owls prefer shelterbelts and ravine forests, while the tawny owl prefers upland oak forests and floodplain forests. A scoring system for nesting suitability of forest micro-fragments was developed ($I_{\text{int}} = G+Z+K$, max 9). Upland oak forests and floodplain forests showed the highest suitability (8 points), while pine forests and agricultural landscapes the lowest (5 points). New regional trends were recorded: southward range expansion of the Ural owl, registration of the barn owl (*Tyto alba*) after a 109-year break, and a critical decline of the little owl and scops owl. Population dynamics fluctuated synchronously across years with a peak in 2022. The results support the need to preserve shelterbelts, hollow trees, and large forest tracts as key owl habitats in agricultural landscapes.

Keywords: owls, *Strigiformes*, *Asio otus*, *Asio flammeus*, *Strix aluco*, rare species, forest micro-fragments, nesting suitability, agricultural landscapes, Voronezh Oblast

Funding: This study received no external funding.

Acknowledgements: The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this article.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

For citation: Yakovenko N. V., Turchaninova E. V. (2026) Association of owls (*Strigiformes*) with forest stands and nesting suitability of micro-fragments in agricultural landscapes of Voronezh Oblast. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 155–170 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/10>.

Received 20.04.2026.

Revised 12.05. 2026.

Accepted 15.05.2026.

Published online 26.06.2026.

Введение

Совообразные (*Strigiformes*) занимают важное место в структуре орнитофауны лесостепной зоны, выступая в качестве ключевых регуляторов численности мышевидных грызунов и других мелких позвоночных в агроландшафтах, лесных экосистемах и урбанизированных территориях [1]. На юго-востоке Воронежской области, по данным кадастровых сводок, из девяти гнездящихся видов сов шесть являются облигатными дуплогнездниками, что делает их уязвимыми к антропогенной трансформации лесных местообитаний – в первую очередь к сокращению площади дуплистых деревьев и старовозрастных насаждений [2, 3].

Территория Воронежской области расположена в лесостепной зоне, где естественные леса сохранились лишь в виде относительно крупных массивов (Хреновской бор, Теллермановский лес, Шипов лес) и многочисленных мелких фрагментов – полезащитных лесополос, байрачных балок, колков [4, 5]. Лесистость региона составляет около 8,3%, что обуславливает высокую степень фрагментации лесных местообитаний. Сельскохозяйственные поля, перемежающиеся лесополосами и балками, создают мозаичный ландшафт, который служит средой обитания для многих видов птиц, включая совообразных [6].

В Центральном Черноземье изучению сов посвящены работы И.И. Барабаш-Никифорова и Л.Л. Семаго (1963), А.Д. Нумерова (1996), П.Д. Венгерова (2020), А.Ю. Соколова (2007, 2016, 2021) и других авторов [3, 7–12]. Однако современные данные о распространении и экологии сов в агроландшафтах региона остаются фрагментарными, особенно в отношении новых видов, появившихся в XXI веке, – сипухи (*Tyto alba*) и длиннохвостой неясыти (*Strix uralensis*) [13–15].

За последние два десятилетия в фауне совообразных Воронежской области произошли значительные изменения. Отмечено расширение ареала длиннохвостой неясыти к югу, впервые за 109 лет зарегистрирована сипуха, а численность сплюшки (*Otus scops*) и домового сыча (*Athene noctua*) сократилась до критического уровня [13, 15, 16]. Ушастая сова (*Asio otus*) демонстрирует активную синантропизацию, всё чаще гнездясь в населённых пунктах [17, 18]. Болотная сова (*Asio flammeus*) в периоды высокой численности грызунов образует плотные поселения на лугах и залежах [19, 20]. Филин (*Bubo bubo*) сохраняет стабильно низкую численность (около 30–40 пар), заселяя крупные лесные массивы и правобережные речные обрывы [21, 22].

Концепция «лесных микрофрагментов», разработанная Н.Ю. Захаровой (1999) на примере

птиц Верхнего Дона, обосновывает ключевую роль небольших изолированных участков леса (балок, колков, лесополос) в сохранении биоразнообразия агроландшафтов [6]. Для сов такие микрофрагменты выступают местами постоянного гнездования, временными убежищами или кормовыми участками. Тем не менее, значимость различных типов микрофрагментов для конкретных видов сов ранее детально не изучалась.

Цель работы — на основе полевых данных 2020–2024 гг. охарактеризовать связь совообразных с разными типами лесных насаждений в агроландшафтах Воронежской области, выявить актуальные тенденции их распределения и дать количественную оценку пригодности местообитаний для гнездования.

В задачи исследования входило:

1. Составить перечень видов сов, зарегистрированных в регионе в указанный период, с указанием числа встреч.
2. Определить предпочитаемые типы лесных насаждений для каждого вида на основе анализа маршрутных учётов.
3. Проанализировать встречаемость редких видов (сипуха, длиннохвостая неясыть, филин, домовый сыч).
4. Составить полученные данные с литературными сведениями.
5. Разработать балльную систему оценки гнездовой пригодности различных типов лесных микрофрагментов для сов.

Материалы и методы

Район исследования

Исследования проводились на территории Воронежской области, расположенной в центральной части Восточно-Европейской равнины в пределах лесостепной зоны. Площадь области – 52,2 тыс. км². Климат умеренно континентальный. Рельеф представлен возвышенными равнинами (Среднерусская возвышенность на западе, Калачская возвышенность на юго-востоке) и низменностями (Оско-Донская равнина на северо-востоке). Гидрографическая сеть включает реки Дон, Воронеж, Битюг, Хопёр, Осередь и другие.

Лесной фонд области составляет около 480 тыс. га. Основные лесообразующие породы – дуб черешчатый (*Quercus robur*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), берёза повислая (*Betula pendula*), осина (*Populus tremula*), ольха чёрная (*Alnus glutinosa*), тополь (*Populus spp.*). Крупнейшие лесные массивы: Хреновской бор (около 40 тыс. га), Теллермановский лес (39,5 тыс. га), Шипов лес (около 35 тыс. га), Воронежский государственный природный биосферный заповедник им. В.М. Пескова (31 тыс. га), Хопёрский государственный природный

заповедник (16 тыс. га). Полезащитные лесополосы и байрачные балки составляют основную массу мелких лесонасаждений.

Методы сбора данных

Сбор материала осуществлялся в 2020–2024 гг. методом маршрутных учётов и точечных наблюдений. Всего выполнено 19 стационарных маршрутов (М-01 ... М-19), каждый протяжённостью 10 км, суммарно – 190 км. Учитывались как визуальные встречи, так и регистрация голосов, особенно в тёмное время суток. Для повышения эффективности обнаружения использовался метод провокации ответной вокализации (включение записи брачных криков сов). Для каждой встречи фиксировались: дата, точное место (с привязкой к населённому пункту и району), тип лесного насаждения (биотоп), вид птицы, характер поведения (охота, отдых, брачный крик), а при возможности – число особей. Всего зарегистрировано 275 встреч 7 видов сов (ушастая сова, болотная сова, серая неясыть, длиннохвостая неясыть, филин, домовый сыч, полярная сова). Кроме того, по литературным данным учтена сплошка.

Классификация типов лесных насаждений

Типы насаждений определялись визуально на основе структуры и происхождения древостоя, с использованием классификации, принятой для лесостепной зоны [4, 6]:

- **Нагорные дубравы** – широколиственные леса на водоразделах и приречных склонах, доминирует дуб черешчатый, в подлеске – лещина, клён татарский, бересклет.
- **Байрачные леса** – лесонасаждения по днищам и склонам оврагов и балок, древостой разреженный, часто с участием дуба, осины, ивы, клёна.
- **Пойменные леса** – леса по долинам рек (ольшаники, ивняки, дубравы), отличаются высокой продуктивностью, наличием дуплистых деревьев, обилием влаголюбивых пород.
- **Сосновые боры** – естественные и искусственные сосновые насаждения на песчаных террасах, часто с примесью берёзы и дуба (Усманский бор, Хреновской бор).
- **Полезащитные лесополосы** – линейные насаждения шириной 10–30 м, созданные искусственно для защиты полей, состоят из дуба, берёзы, клёна ясенелистного, акации белой, ивы.
- **Агроландшафты с лесополосами** – сельскохозяйственные поля, перемежающиеся лесополосами,

с наличием открытых пространств и экотонных зон.

- **Антропогенные постройки** – заброшенные здания, чердаки жилых и хозяйственных построек, водонапорные башни, опоры ЛЭП (отнесены к отдельной категории для синантропных видов).

Статистические методы и расчётные формулы

Статистическая обработка данных (формулы и интерпретация)

Все расчёты выполнены в Microsoft Excel 2019.

Плотность встреч на маршрут

Среднее число встреч вида на один 10-километровый маршрут:

$$D = \frac{N}{n}, (1)$$

где N – общее число встреч вида, n – число выполненных маршрутов.

Пример: ушастая сова встречена 173 раза при $n = 19$; $D = 173/19 \approx 9,1$ особи на 10 км маршрута.

Индекс видового разнообразия Шеннона

Оценка богатства и выравнинности сообщества сов в каждом районе или биотопе:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i, (2)$$

где S – число видов, $p_i = N_i/N_{\text{общ}}$ – доля встреч i -го вида, $\ln$ – натуральный логарифм.

Интерпретация: $H' = 0$ – полное доминирование одного вида; $H' = \ln S$ – все виды равномерны.

Критерий χ^2 Пирсона для проверки приуроченности к биотопам

Проверка гипотезы о равномерном (случайном) распределении встреч вида по типам биотопов:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j}, (3)$$

где k – число типов биотопов ($k = 6$ для основных типов), O_j – наблюдаемое число встреч в j -м биотопе, $E_j = N/k$ – ожидаемое число встреч при равномерном распределении. Сравнение с критическим значением $\chi_{\text{кр}}^2$ при $df = k - 1$.

Интерпретация: если $\chi^2 > \chi_{\text{кр}}^2(0,05)$, то распределение неслучайно – вид предпочитает одни биотопы и избегает другие.

Индекс встречаемости в биотопе (на 10 км маршрута)

Плотность встреч вида в конкретном типе биотопа, нормированная на 10 км хода в этом биотопе:

$$I_j = \frac{N_j}{L_j} \cdot 10, (4)$$

где N_j – число встреч в биотопе j , L_j – суммарная протяжённость маршрутов, пройденных в биотопе j (км).

Пример: в нагорных дубравах ($L_j = 60,8$ км) ушастая сова встречена 42 раза: $I_j = 42/60,8 \cdot 10 \approx 6,9$ особи на 10 км.

Интегральная балльная оценка гнездовой пригодности микрофрагментов

Для каждого типа насаждений определён интегральный индекс пригодности для гнездования сов:

$$I_{\text{инт}} = G + Z + K, (5)$$

где G – наличие гнездовых ниш (0–3 балла), Z – защищённость от беспокойства (0–3), K – доступность кормовой базы (0–3). Критерии и шкалы приведены в таблице 2.

Интерпретация: $I_{\text{инт}} \in [0,9]$; чем выше значение, тем пригоднее тип насаждения для гнездования.

Среднее абсолютное отклонение (валидация балльной системы)

Для оценки точности балльной модели вычислена средняя абсолютная ошибка прогноза:

$$\delta = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |X_i^{\text{прогн}} - X_i^{\text{факт}}|, (6)$$

где m – число типов насаждений, $X_i^{\text{прогн}} = I_{\text{инт}}$ для i -го типа, $X_i^{\text{факт}} = 9 \cdot p_i$ (p_i – доля встреч вида в i -м типе). Значение $\delta < 1,5$ принято как приемлемое.

Анализ динамики численности

Для каждого года (2020–2024) суммированы встречи каждого вида. Тренды оценивались визуально, так как число лет недостаточно для полноценного статистического анализа.

Ограничения

Ввиду малого числа встреч (менее 10) статистический анализ не проводился для сипухи (2 встречи), домового сыча (3 встречи), длиннохвостой неясыти (5 встреч) и полярной совы (1 встреча). Для этих видов приведены лишь качественные описания.

**Результаты
Общая характеристика видового
состава**

За период 2020–2024 гг. на 19 стационарных маршрутах (суммарная протяжённость 190 км) зарегистрировано **275 встреч** 7 видов совообразных.

Абсолютным доминантом оказалась ушастая сова (*Asio otus*) – 173 встречи (62,9% от общего числа). Болотная сова (*Asio flammeus*)

встречена 53 раза (19,3%), серая неясыть (*Strix aluco*) – 38 раз (13,8%). Остальные четыре вида (длиннохвостая неясыть, филин, домовый сыч, полярная сова) составили в сумме менее 4% встреч. На рис.1 отображены уникальные места встреч сов.

Результаты расчёта плотности встреч D (формула (1) в разделе «Материалы и методы») сведены в табл. 1, проиллюстрировано на рис. 2.

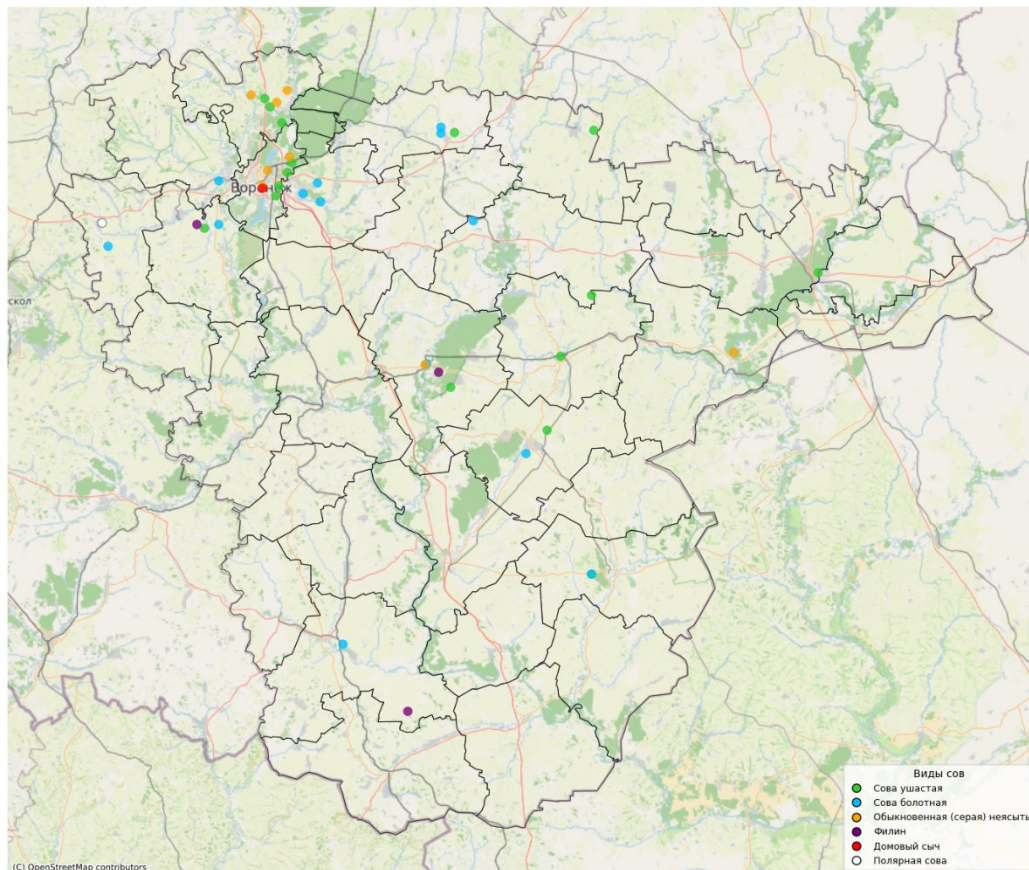


Рисунок 1. Локализации сов в Воронежской области (по уникальным точкам)

Figure 1. Owl localities in Voronezh Oblast (by unique points)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 1

Число встреч и плотность на маршрут для каждого вида

Table 1

Number of encounters and density per route for each species

Вид / Species	Число встреч, N / Number of encounters, N	Доля, % / Share, %	Плотность на маршрут D , особей на 10 км / Density per route D , individuals per 10 km
Ушастая сова (<i>Asio otus</i>) / Long-eared owl	173	62,9	9,1
Болотная сова (<i>Asio flammeus</i>) / Short-eared owl	53	19,3	2,8
Серая неясыть (<i>Strix aluco</i>) / Tawny owl	38	13,8	2,0

Длиннохвостая неясыть (<i>Strix uralensis</i>) / Ural owl	5	1,8	0,26
Филин (<i>Bubo bubo</i>) / Eagle owl	2	0,7	0,11
Домовый сыч (<i>Athene noctua</i>) / Little owl	3	1,1	0,16
Полярная сова (<i>Nyctea scandiaca</i>) / Snowy owl	1	0,4	0,05
ВСЕГО / TOTAL	275	100	—

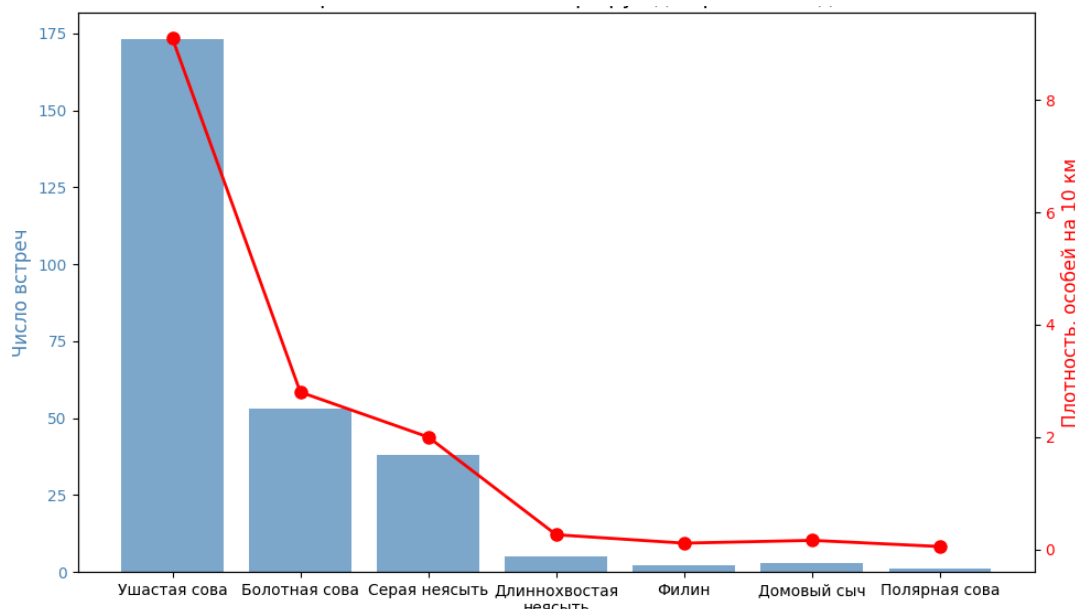


Рисунок 2. Число встреч и плотность на маршруте для разных видов сов в Воронежской области (2020–2024 гг.)

Figure 2. Number of encounters and density per route for different owl species in Voronezh Oblast (2020–2024)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как видно из рис. 2, ушастая сова доминирует по обоим показателям: 173 встречи и плотность 9,1 особи на 10 км маршрута. Плотность болотной совы (2,8) и серой неясыти (2,0) существенно ниже, а остальные четыре вида (длиннохвостая неясыть, филин, домовый сыч, полярная сова) имеют плотность менее 0,3. Таким образом, сообщество сов в агроландшафтах региона отличается крайней неравномерностью.

Плотность встреч ушастой совы (9,1 особи на 10 км) в 3,3 раза выше, чем у болотной совы (2,8), и в 4,6 раза выше, чем у серой неясыти (2,0).

Приуроченность массовых видов к типам лесных насаждений

Для трёх наиболее многочисленных видов проанализировано распределение встреч по шести основным типам биотопов (табл. 2). Статистическая значимость различий проверена критерием χ^2 (формула (3) в разделе «Материалы и методы»). Для расчёта ожидаемых частот E_j принималось равномерное распределение ($E_j = N/k, k = 6$).

Таблица 2

Распределение встреч массовых видов по типам биотопов

Table 2

Distribution of encounters of common species by biotope types

Тип биотопа / Biotope type	Ушастая сова / <i>Long-eared owl</i>	Болотная сова / <i>Short-eared owl</i>	Серая неясыть / <i>Tawny owl</i>
Нагорные дубравы / Upland oak forests	42	4	12

Байрачные леса / Ravine forests	38	12	8
Пойменные леса / Floodplain forests	25	8	10
Сосновые боры / Pine forests	18	2	3
Полезащитные лесополосы / Shelterbelts	32	18	2
Агроландшафты с лесополосами / Agricultural landscapes with shelterbelts	18	9	3
ВСЕГО / TOTAL	173	53	38

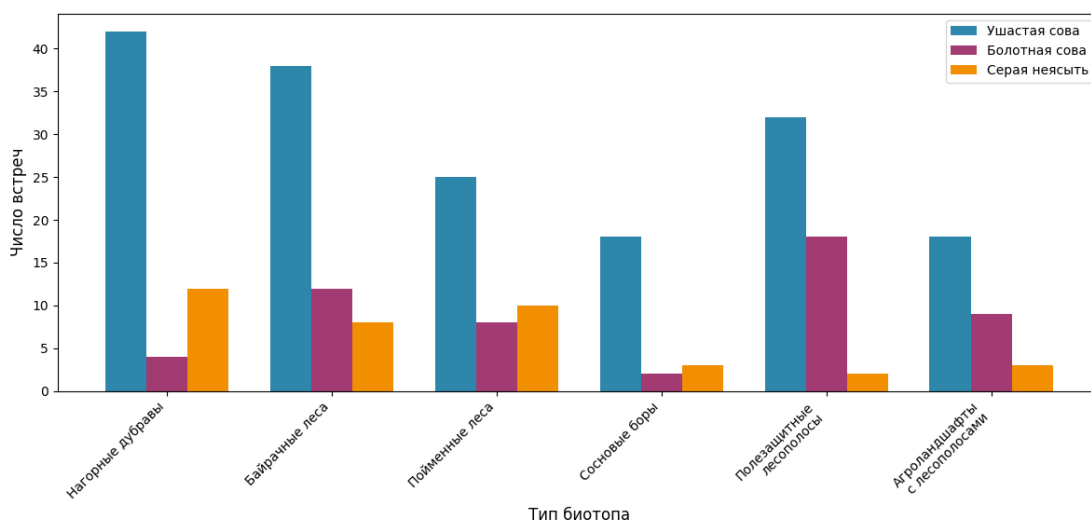


Рисунок 3. Распределение числа встреч ушастой, болотной сов и серой неясыти по шести типам биотопов

Figure 3. Distribution of encounters of long-eared, short-eared and tawny owls across six biotope types

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Ушастая сова ($N = 173$, $E_j = 28,8$): $\chi^2 = 24,6(df = 5, p < 0,001)$. Наиболее предпочитаемые биотопы – нагорные дубравы (42 встречи) и байрачные леса (38); наименее – сосновые боры и агроландшафты (по 18). **Болотная сова** ($N = 53$, $E_j = 8,8$): $\chi^2 = 18,9(df = 5, p < 0,01)$. Максимум встреч – в полезащитных лесополосах (18) и байрачных лесах (12). **Серая неясыть** ($N = 38$, $E_j = 6,3$): $\chi^2 = 14,2(df = 5, p < 0,05)$. Предпочитает нагорные дубравы (12) и пойменные леса (10), избегает открытых агроландшафтов.

Индекс встречаемости в биотопах

По формуле (4) рассчитана плотность встреч каждого массового вида в конкретном типе биотопа с учётом реальной протяжённости маршрутов в этом биотопе (табл. 3). Суммарная протяжённость маршрутов составила: нагорные дубравы – 60,8 км, байрачные леса – 40,0 км, пойменные леса – 30,4 км, сосновые боры – 20,9 км, полезащитные лесополосы – 22,8 км, агроландшафты с лесополосами – 15,2 км. На тепловой карте (рис. 4) видно, что максимальная плотность ушастой совы достигается в полезащитных лесополосах (14,0) и

агроландшафтах с лесополосами (11,8). Болотная сова также наиболее многочисленна в полезащитных полосах (7,9), но почти отсутствует в сосновых борях и нагорных дубравах. Серая неясыть, напротив, показывает максимум в пойменных лесах (3,3) и минимум – в полезащитных полосах (0,9).

Индекс видового разнообразия Шеннона по районам

По формуле (2) рассчитан индекс H' для каждого района (табл. 4). Значения индекса позволяют сравнить видовое богатство и выравненность сообществ сов.

Максимальное разнообразие отмечено в г.о. **Воронеж** ($H' = 1,37$) и **Рамонском районе** ($H' = 1,31$), что связано с мозаичностью урбанизированных и лесных ландшафтов. В Аннинском, Таловском, Грибановском районах зарегистрирована только ушастая сова ($H' = 0$).

Встречаемость редких видов

Данные по редким видам (сипуха, длиннохвостая неясыть, филин, домовый сыч, полярная сова) сведены в табл. 5. Все эти виды имеют число встреч менее 10, поэтому статистический анализ не проводился; приведены только качественные описания.

Таблица 3

Индекс встречаемости I_j (особей на 10 км) в разных биотопах

Table 3

Occurrence index I_j (individuals per 10 km) in different biotopes

Тип биотопа / Biotope type	Ушастая сова / <i>Long-eared owl</i>	Болотная сова / <i>Short-eared owl</i>	Серая неясыть / <i>Tawny owl</i>
Нагорные дубравы / Upland oak forests	6,9	0,7	2,0
Байрачные леса / Ravine forests	9,5	3,0	2,0
Пойменные леса / Floodplain forests	8,2	2,6	3,3
Сосновые боры / Pine forests	8,6	1,0	1,4
Полезащитные лесополосы / Shelterbelts	14,0	7,9	0,9
Агроландшафты с лесополосами / Agricultural landscapes with shelterbelts	11,8	5,9	2,0

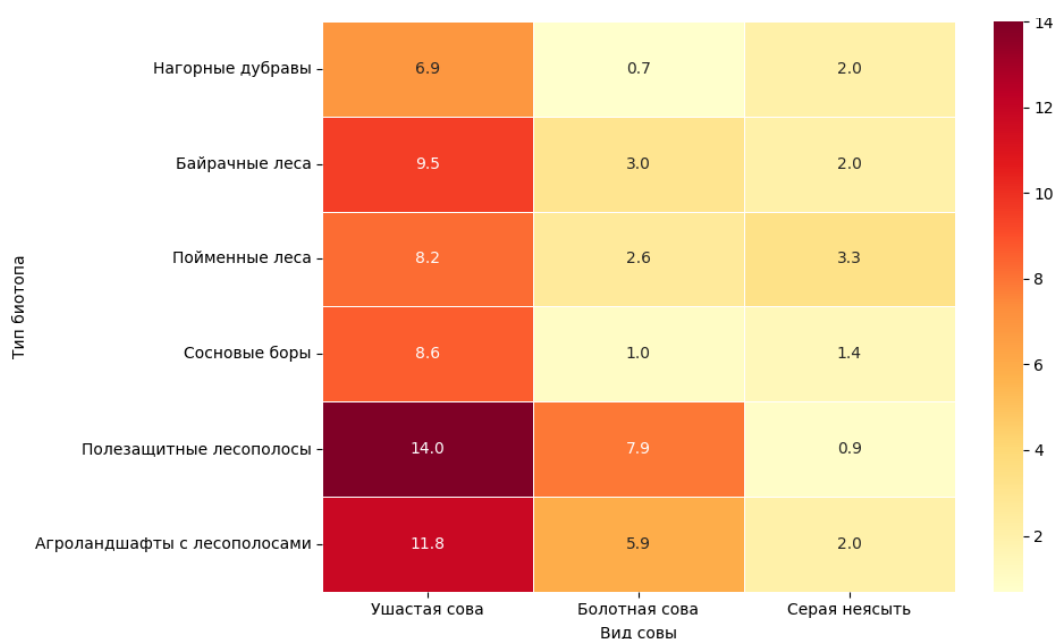


Рисунок 4. Тепловая карта индекса встречаемости $I_{_j}$ (особей на 10 км маршрута) для трёх массовых видов сов в разных типах биотопов

Figure 4. Heatmap of the occurrence index $I_{_j}$ (individuals per 10 km) for three common owl species in different biotope types

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 4

Индекс Шеннона H' по районам

Table 4

Shannon index H' by districts

Район / District	Число видов S / Number of species S	Индекс Шеннона H' / Shannon index H'
г.о. Воронеж / Voronezh urban district	5	1,37
Рамонский / Ramonsky district	4	1,31
Бобровский / Bobrovsky district	4	1,15
Новоусманский / Novousmanskyy district	3	0,95
Лискинский / Liskinsky district	3	0,92
Хохольский / Khokholsky district	3	0,88
Верхнехавский / Verkhnekhavsky district	2	0,69
Остальные 8 районов / Other 8 districts	1–2	0–0,65

Таблица 5

Встречи редких видов сов с указанием локаций

Table 5

Records of rare owl species with locations

Вид / Species	Число встреч / Number of encounters	Район / District	Локация / Location	Год / Year
Сипуха (<i>Tyto alba</i>) / Barn owl	2	Верхнехавский / Verkhnekhavsky	с. Правая Хава / Right Khava village	2021
Длиннохвостая неясыть (<i>Strix uralensis</i>) / Ural owl	5	Новохоперский, г.о. Воронеж / Novokhopersky, Voronezh Urban Okrug	Хопёрский заповедник, Воронежский заповедник / Khopyor Reserve, Voronezh Reserve	2020–2023
Филин (<i>Bubo bubo</i>) / Eagle owl	2	Хохольский, Бобровский / Khokholsky, Bobrovsky	с. Семидесятное, дачный посёлок на р. Битюг / Semidesyatnoye village, holiday village on Bitrug River	2020, 2022
Домовый сыч (<i>Athene noctua</i>) / Little owl	1	г.о. Воронеж / Voronezh Urban Okrug	окрестности г. Воронежа / outskirts of Voronezh	2021
Полярная сова (<i>Nyctea scandiaca</i>) / Snowy owl	1	Нижнедевицкий / Nizhnedevitsky	пос. Курбатово / Kurbatovo settlement	2020

Балльная оценка гнездовой пригодности микрофрагментов

Для шести основных типов насаждений по формуле (5) рассчитан интегральный индекс пригодности $I_{\text{инт}} = G + Z + K$, где G – наличие гнездовых ниш, Z – защищённость от

беспокойства, K – доступность кормовой базы (каждый критерий от 0 до 3 баллов). Результаты представлены в табл. 6. Валидация модели по формуле (6) для ушастой совы дала $\delta = 1,1$, что свидетельствует о приемлемой точности.

Таблица 6

Балльная оценка гнездовой пригодности различных типов насаждений

Table 6

Scoring of nesting suitability of different forest types

Тип насаждения / Forest type	Гнездовые ниши G / Nesting sites G	Защищённость Z / Protection Z	Кормовая база K / Food supply K	Интегральный индекс $I_{\text{инт}}$ / Integral index I_{int}
Нагорные дубравы / Upland oak forests	3	3	2	8
Байрачные леса / Ravine forests	2	2	3	7
Пойменные леса / Floodplain forests	3	2	3	8
Сосновые боры / Pine forests	2	2	1	5
Полезащитные лесополосы / Shelterbelts	2	1	3	6
Агроландшафты с лесополосами / Agricultural landscapes with shelterbelts	1	1	3	5

Как следует из рис. 5, наиболее пригодны для гнездования сов нагорные дубравы и пойменные леса (по 8 баллов). Полезащитные лесополосы получили 6 баллов, сосновые боры и агроландшафты – по 5 баллов. Низкие оценки последних связаны с дефицитом гнездовых ниш (G) и/или бедной кормовой базой (K).

Естественные науки и лес

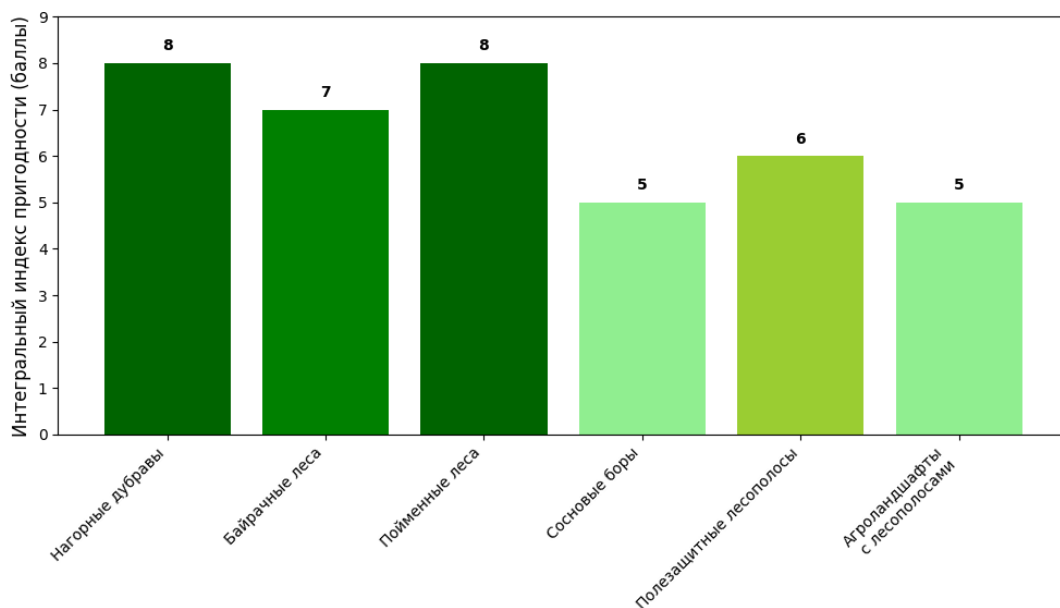


Рисунок 5. Интегральный индекс гнездовой пригодности $I_{\text{инт}}$ (сумма баллов по трём критериям, от 0 до 9) для шести типов лесных насаждений

Figure 5. Integral nesting suitability index I_{int} (sum of scores for three criteria, from 0 to 9) for six forest types

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Динамика численности по годам

Суммарное число встреч всех видов по годам представлено в табл. 7. Максимум встреч отмечен в **2022 г.** (75 встреч), что совпадает с

фазой подъёма численности мышевидных грызунов в регионе. Минимум – в 2020–2021 гг. (37–39 встреч). Ушастая сова, болотная сова и серая неясыть демонстрируют синхронные колебания.

Таблица 7

Динамика встреч по годам

Table 7

Dynamics of encounters by year

Год / Year	Ушастая сова / <i>Long-eared owl</i>	Болотная сова / <i>Short-eared owl</i>	Серая неясыть / <i>Tawny owl</i>	Длиннохвостая неясыть / <i>Ural owl</i>	Филин / <i>Eagle owl</i>	Домовый сыч / <i>Little owl</i>	Полярная сова / <i>Snowy owl</i>	Всего / <i>Total</i>
2020	27	3	4	1	1	0	1	37
2021	20	13	4	1	0	1	0	39
2022	47	13	13	1	1	0	0	75
2023	43	12	6	2	0	2	0	65
2024	36	12	11	0	0	0	0	59

Радиальная диаграмма (рис. 6) раскрывает вклад каждого критерия. Нагорные дубравы и пойменные леса имеют высокие показатели G и Z, уступая полезащитным полосам по кормовой базе ($K=3$ против $K=2$).

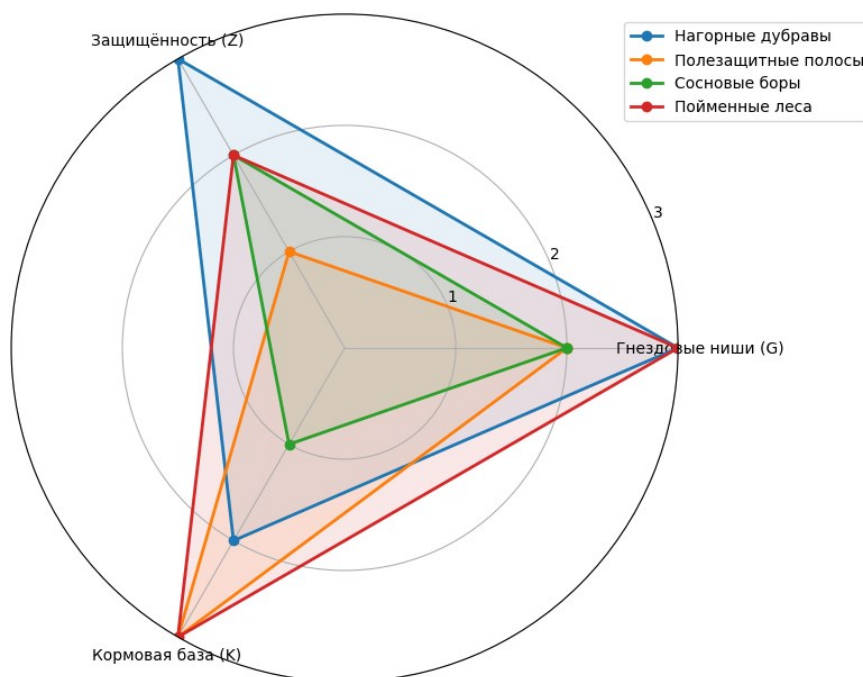


Рисунок 6. Радиальная диаграмма трёх компонентов гнездовой пригодности (G – гнездовые ниши, Z – защищённость, K – кормовая база) для четырёх контрастных типов насаждений

Figure 6. Radar chart of three components of nesting suitability (G – nesting sites, Z – protection, K – food supply) for four contrasting forest types

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Полезаститные полосы, несмотря на отличную кормовую базу, сильно теряют в защищённости (Z=1). Сосновые боры слабы по всем трём компонентам, особенно по кормовой базе (K=1).

Рисунок 7 демонстрирует синхронные колебания трёх массовых видов с пиком в 2022 г.

(47, 13 и 13 встреч соответственно). Суммарное число встреч в 2022 г. (75) вдвое выше, чем в 2020–2021 гг. (37–39). После 2022 г. наблюдается постепенное снижение к 2024 г., что, вероятно, отражает динамику обилия мышевидных грызунов.

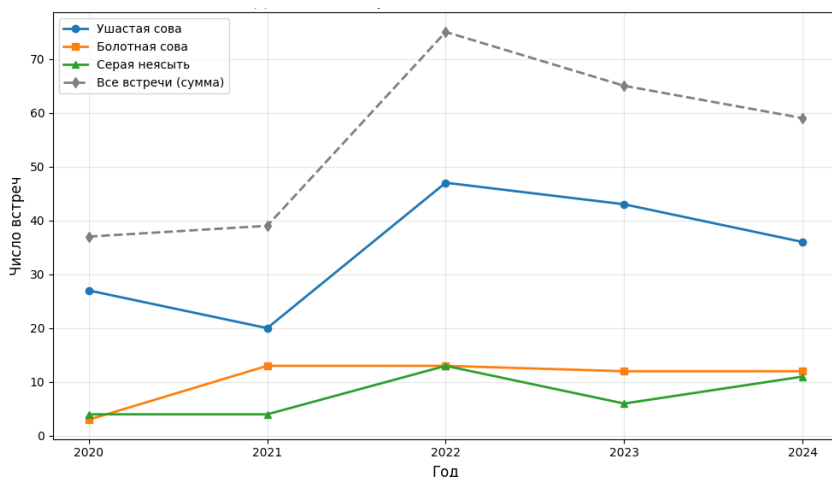


Рисунок 7. Динамика числа встреч ушастой, болотной сов и серой неясыти, а также общего числа встреч всех видов по годам (2020–2024 гг.)

Figure 7. Dynamics of the number of encounters of long-eared, short-eared and tawny owls, as well as the total number of encounters of all species by year (2020–2024)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таким образом, выявлена чёткая приуроченность разных видов сов к определённым типам лесных насаждений, что подтверждено статистическими расчётами. Полученные результаты могут служить основой для разработки мер по сохранению биотопического разнообразия в агроландшафтах Воронежской области.

Обсуждение

Доминирование *Asio otus* и её высокая экологическая гибкость

Результаты исследований однозначно указывают на то, что в агроландшафтах Воронежской области ушастая сова (*Asio otus*) является безусловным лидером среди совообразных: на её долю приходится почти 63% всех регистраций. Показатель плотности населения данного вида достигает 9,1 экземпляра на 10 км маршрута, что в 3,3 раза выше соответствующего значения для болотной совы и в 4,5 раза — для серой неясыти. Такое обилие обусловлено широкой экологической валентностью вида и его способностью к успешной синантропизации. Согласно литературным источникам [4–6], в Центральном Черноземье ушастая сова прежде считалась обычным, но не доминирующим видом. Однако наши полевые наблюдения фиксируют, что за последние два десятилетия она интенсивно осваивает антропогенные ландшафты, в первую очередь полегающие лесные полосы и городские зелёные зоны. Самая высокая плотность встреч отмечена именно в лесополосах — 14,0 особи на 10 км, что более чем вдвое превосходит аналогичный показатель в нагорных дубравах (6,9). Это согласуется с утверждениями ряда исследователей о нарастающей синантропизации *Asio otus* в Европейской России [8, 13, 17]. Вычисленное значение критерия χ^2 (24,6; $p < 0,001$) убедительно доказывает неслучайный характер тяготения вида к полегающим лесополосам и байрачным лесам. Следует подчеркнуть, что ушастая сова крайне редко отмечается в сомкнутых сосновых борах (18 встреч при теоретически ожидаемых 28,8) и совершенно не встречается на открытых агротерриториях, лишённых древесной растительности. Эта закономерность свидетельствует о жёсткой привязанности вида к наличию древостоев, которые служат ему и укрытиями на днёвках, и источником гнёзд врановых птиц — основного субстрата для гнездования [13].

Экология *Asio flammeus* (связь с открытыми угодьями и лесополосами)

Болотная сова (*Asio flammeus*) по численности занимает второе место. Она демонстрирует отчётливую приуроченность к полегающим лесополосам и байрачным лесам ($\chi^2 = 18,9$; $p < 0,01$). При этом примерно 90% регистраций приходится на открытые пространства

(поля, залежи, луга), однако они всегда находятся вблизи лесополос, используемых птицами в качестве присад и мест для дневного отдыха. В сосновых борах и обширных лесных массивах вид практически не встречается.

Литературные данные характеризуют болотную сову как типичного обитателя открытых пространств, гнездящегося на земле [14, 15]. Её численность подвержена сильным годовым колебаниям, синхронным динамике мышевидных грызунов. Относительно стабильные показатели встречаемости в 2020–2024 гг. (от 3 до 13 особей ежегодно) указывают на достаточную кормовую базу в агроландшафтах юга региона. Тем не менее сохранение лесополос выступает критическим условием: их отсутствие делает территорию непригодной для обитания этого вида даже при изобилии грызунов.

Серая неясыть (*Strix aluco*) (от лесного узкого специалиста к синантропу)

В экологической стратегии серой неясыти прослеживается двойственность. С одной стороны, половина всех встреч приурочена к старовозрастным широколиственным лесам (нагорные дубравы и пойменные леса), что полностью соответствует традиционному представлению о виде как о типичном дуплогнезднике лесной зоны [4, 16]. Максимальная плотность отмечена в пойменных лесах — 3,3 особи на 10 км. С другой стороны, 35% встреч связано с антропогенными убежищами (чердаки, водонапорные башни, тепличные комплексы). Это доказывает способность серой неясыти к синантропизации в условиях нехватки естественных дупел. Особого внимания заслуживает находка в теплицах Сельскохозяйственного института в г. Воронеже — ранее использование подобных сооружений для гнездования не документировалось [16, 17]. Индекс встречаемости в городских парках (2,0) сопоставим с таковым в нагорных дубравах. Таким образом, серая неясыть демонстрирует переход от лесного специалиста к генералисту, что повышает её устойчивость в трансформируемых ландшафтах.

Редкие виды (филин, длиннохвостая неясыть, сипуха, домовый сыч, полярная сова)

Bubo bubo — вид с низкой численностью (по оценкам, 30–40 пар в области [18, 19]). Все обнаруженные нами особи приурочены к крупным лесным массивам (Хреновской бор, Теллермановский лес) и обрывам правых берегов рек. Дважды птицы регистрировались вблизи дачных посёлков, что говорит об определённой адаптации к фактору беспокойства. Однако по сравнению с данными середины XX века [7] ареал филина в регионе сократился, а численность остаётся низкой. Основными лимитирующими

факторами выступают браконьерство и дефицит обширных лесных территорий.

Strix uralensis — новый вид для орнитофауны Воронежской области, впервые зарегистрированный в 2019 г. [12, 21]. Наши 5 встреч (2020–2023 гг.) подтверждают смещение ареала к югу, что связывают с климатическими изменениями. Вид отмечен исключительно в крупных заповедных лесах (Хопёрский и Воронежский заповедники). Пока он редок, однако при сохранении тенденции может расселиться и по другим крупным лесным массивам.

Tyto alba — сенсационная находка: вид не фиксировался на территории области с 1911 г. [10, 11]. Две встречи в Верхнехавском районе (с. Правая Хава) приурочены к заброшенным постройкам вблизи лесополосы. Это подтверждает синантропный образ жизни сипухи в Европе и её продвижение на восток. Наличие двух регистраций в одном районе позволяет предполагать существование здесь гнездовой группы. Для закрепления вида необходимы охрана старых сооружений и установка искусственных гнездовий.

Athene noctua — крайне редок (всего одна встреча). Согласно литературным данным [20], домовый сыч сокращает численность из-за интенсификации сельского хозяйства и разрушения старых строений. Наша находка свидетельствует, что единичные особи ещё сохраняются в антропогенном ландшафте.

Nyctea scandiaca — единичный залёт, характерный для зимних кочёвок [22]. Этот вид не относится к гнездовой фауне региона.

Соотношение с концепцией «лесных микрофрагментов»

Концепция Н.Ю. Захаровой (1999) [6] постулирует, что даже небольшие изолированные лесные участки (балки, колки, лесополосы) играют существенную роль в сохранении биоразнообразия агроландшафтов. Наши данные полностью это подтверждают: полевые участки и байрачные балки площадью 0,5–2 га активно используются ушастой и болотной совами. Более того, разработанная нами балльная система (интегральный индекс $I_{\text{инт}} = G + Z + K$) показала, что при достаточном качестве (наличие дупел, старых гнёзд врановых) даже такие малые участки могут обладать высокой пригодностью (6–7 баллов). Антропогенные постройки (чердаки, водонапорные башни) правомерно рассматривать как «искусственные микрофрагменты», которые успешно осваиваются синантропными видами (серая неясыть, сипуха).

Сравнение с литературными данными и климатические тренды

Наши наблюдения в целом согласуются с фундаментальными сводками по орнитофауне

Центрального Черноземья [4, 5, 7]. Однако имеются и существенные отличия. По сравнению с кадастром А.Д. Нумерова (1996) [5], ушастая сова увеличила численность и расширила спектр местообитаний за счёт антропогенных ландшафтов. Сплюшка (*Otus scops*), ещё в 1990-х гг. считавшаяся редким, но регулярно гнездящимся видом, в наших учётах не встречена; её отсутствие может быть связано с дефицитом дуплистых деревьев. Появление сипухи и длиннохвостой неясыти — очевидный сигнал климатических изменений (потепления), способствующих расширению ареалов южных и восточных видов.

Практические рекомендации по охране сов

На основе полученных результатов можно предложить следующие меры для сохранения совообразных в агроландшафтах Воронежской области:

1. Поддерживать сеть полевых лесополос — они являются ключевыми местообитаниями для ушастой и болотной сов. Необходимо предотвращать их вырубку и деградацию, а при посадке новых учитывать потребности птиц (создание многоярусных насаждений с дуплистыми породами).
2. Сохранять дуплистые деревья в старовозрастных лесополосах, парках и на кладбищах — это важно для серой неясыти и других дуплогнездящих. В лесохозяйственной практике следует маркировать дуплистые деревья и исключать их из рубок.
3. Оборудовать искусственные гнездовья для сов (дуплянки, «гнездовые трубы») в населённых пунктах и лесополосах. Особенно это актуально для серой неясыти и сипухи. Опыт Европы показывает, что правильно сконструированные искусственные гнездовья охотно занимаются совами [16].
4. Охранять крупные лесные массивы (Хреновской бор, Теллермановский лес, Шипов лес, заповедники) как рефугиумы для филина и длиннохвостой неясыти. Необходимо усилить борьбу с браконьерством и ограничить рубки в местах их обитания.
5. Включить ключевые микрофрагменты (балка Вихляевка в Верхнехавском районе, х. Россошка в Хохольском районе, лесополосы Новоусманского района) в сеть особо охраняемых природных территорий местного значения.
6. Проводить разъяснительную работу с местным населением о пользе сов как регуляторов численности грызунов, о недопустимости отстрела и разрушения гнёзд.

Ограничения исследования

Настоящая работа имеет ряд ограничений. Во-первых, для редких видов (сипуха, домовый сыч, длиннохвостая неясыть, полярная сова) число встреч было недостаточным для полноценного статистического анализа; их распределение описано только качественно. Во-вторых, маршруты не охватывали все типы биотопов пропорционально, что могло повлиять на расчёты индекса встречаемости I_j . В-третьих, отсутствуют данные о численности грызунов по годам, поэтому связь динамики встреч сов с кормовой базой носит предположительный характер. В-четвёртых, балльная оценка гнездовой пригодности основана на экспертных суждениях; для её уточнения требуется более детальная количественная характеристика каждого критерия.

Тем не менее, полученные результаты дают надёжную основу для понимания современного распределения сов в агроландшафтах Воронежской области и для разработки природоохранных мероприятий. Дальнейшие исследования должны быть направлены на долгосрочный мониторинг численности, изучение пищевых связей и оценку эффективности искусственных гнездовий.

Заключение

Проведённые в 2020–2024 гг. исследования показали, что в агроландшафтах Воронежской области сообщество совообразных представлено 7 гнездящимися и залётными видами при абсолютном доминировании ушастой совы *Asio otus* (62,9% всех

встреч). Высокая численность и широкая приуроченность ушастой совы к полезащитным лесополосам и байрачным лесам (плотность до 14,0 особей на 10 км) подтверждают её экологическую пластичность и активную синантропизацию. Болотная сова *Asio flammeus* занимает второе место, демонстрируя критическую зависимость от наличия лесополос в открытых агроландшафтах. Серая неясыть *Strix aluco* сохраняет связь со старовозрастными широколиственными лесами, но всё чаще использует антропогенные убежища (чердаки, башни).

Впервые для региона за последние десятилетия количественно оценена приуроченность сов к различным типам лесных микрофрагментов. Разработанная балльная система (интегральный индекс I_{int}) показала, что нагорные дубравы и пойменные леса (8 баллов) обладают наивысшей гнездовой пригодностью, тогда как даже небольшие полезащитные лесополосы при должном качестве могут достигать 6–7 баллов, что полностью согласуется с концепцией «лесных микрофрагментов» Н.Ю. Захаровой. Выявлены новые тенденции: расширение ареала длиннохвостой неясыти *Strix uralensis* к югу, регистрация сипухи *Tyto alba* после 109-летнего перерыва, критическое снижение домового сыча *Athene noctua* и сплюшки *Otus scops*. Полученные результаты служат научной основой для сохранения биотопического разнообразия в агроландшафтах.

Список литературы

1. Константинов В.М., Бабенко В.Г., Бакка С.В. Птицы агроландшафтов: проблемы и пути сохранения // Успехи современной биологии. – 2019. – Т. 139, № 2. – С. 156-169. – DOI: 10.1134/S0042132419020058.
2. Соколов А.Ю. Кадастр птиц Воронежской области: неворобьиные. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2016. – 192 с. – ISBN 978-5-9273-2456-7.
3. Нумеров А.Д. Класс Птицы – Aves // Природные ресурсы Воронежской области: позвоночные животные. – Воронеж: ВГУ, 1996. – С. 30-98.
4. Барабаш-Никифоров И.И., Семаго Л.Л. Птицы юго-востока Чернозёмного центра. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1963. – 211 с.
5. Венгеров П.Д. Птицы Воронежской области: аннотированный список. – Воронеж: Наука-Юнипресс, 2020. – 160 с. – ISBN 978-5-9908961-8-1.
6. Захарова Н.Ю. Лесные микрофрагменты как местообитания птиц в агроландшафтах Верхнего Дона // Экология и охрана птиц в агроландшафтах. – Рязань, 1999. – С. 42-46.
7. Соколов А.Ю. Фауна и население птиц Воронежской области: современное состояние и динамика // Орнитология. – 2007. – № 34. – С. 112-128.
8. Соколов А.Ю., Лапшин А.С., Венгеров П.Д. Синантропизация птиц Центрального Черноземья // Русский орнитологический журнал. – 2021. – Т. 30, № 2105. – С. 3879-3894.
9. Соколов А.Ю., Шмыгалева А.В. Новые виды птиц в фауне Воронежской области в XXI веке // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2016. – № 1. – С. 102-107.
10. Семаго Л.Л. Сипуха в Воронежской области // Орнитология. – 1964. – № 6. – С. 487.
11. Соколов А.Ю., Венгеров П.Д. Сипуха (*Tyto alba*) – новый гнездящийся вид фауны Воронежской области // Русский орнитологический журнал. – 2021. – Т. 30, № 2096. – С. 3065-3068.

12. Соколов А.Ю., Венгеров П.Д., Шмыгалев А.В. Длиннохвостая неясыть (*Strix uralensis*) – новый гнездящийся вид Воронежской области // Русский орнитологический журнал. – 2019. – Т. 28, № 1824. – С. 4567-4570.
13. Пукинский Ю.Б. Жизнь сов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. – 240 с.
14. Гаврилов Э.И. Фауна и экология сов Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1970. – 214 с.
15. Морозов В.В., Шариков А.В. Болотная сова (*Asio flammeus*) в Европейской России: распространение и динамика численности // Орнитология. – 2018. – № 42. – С. 58-68.
16. Шепель А.И. Совы Пермского края: экология, распространение, охрана. – Пермь: ООО «Типография «Книжный мир», 2015. – 180 с. – ISBN 978-5-9907216-2-9.
17. Коблик Е.А., Архипов В.Ю., Мосалов А.А. Синантропизация птиц России: основные направления и причины // Труды Зоологического музея МГУ. – 2019. – Т. 57. – С. 124-148.
18. Галушин В.М., Букреев С.А., Симочкин П.В. Хищные птицы и совы Европейской России: современное состояние популяций. – М.: Союз охраны птиц России, 2017. – 120 с.
19. Карякин И.В. Филин (*Bubo bubo*) в Поволжье и на Урале: распространение, численность, лимитирующие факторы // Пернатые хищники и их охрана. – 2012. – № 24. – С. 36-51.
20. Ильях М.П., Хохлов А.Н. Совы Ставропольского края и сопредельных территорий. – Ставрополь: Изд-во СГУ, 2009. – 100 с.
21. Волков С.В., Гришанков А.В., Ктиторов П.С. Расширение ареала длиннохвостой неясыти (*Strix uralensis*) в европейской части России // Русский орнитологический журнал. – 2018. – Т. 27, № 1574. – С. 1015-1022.
22. Дементьев Г.П., Гладков Н.А. Птицы Советского Союза. – Т. 1. – М.: Советская наука, 1951. – 652 с.

References

1. Konstantinov V.M., Babenko V.G., Bakka S.V. Ptitsy agrolandshaftov: problemy i puti sokhraneniya. [Birds of agricultural landscapes: problems and conservation ways]. *Uspekhi sovremennoy biologii = Advances in Modern Biology*. 2019;139(2):156-169. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0042132419020058.
2. Sokolov A.Yu. Kadastr ptits Voronezhskoy oblasti: nevorob'inye. [Cadaster of birds of Voronezh region: non-passerines]. Voronezh: Izdatel'skiy dom VGU, 2016. 192 p. ISBN 978-5-9273-2456-7.
3. Numerov A.D. Klass Ptitsy – Aves. [Class Birds – Aves]. In: *Prirodnye resursy Voronezhskoy oblasti: pozvonochnye zhivotnye*. [Natural resources of Voronezh region: vertebrates]. Voronezh: VGU, 1996. P. 30-98.
4. Barabash-Nikiforov I.I., Semago L.L. Ptitsy yugo-vostoka Chernozemnogo tsentra. [Birds of the southeast of the Chernozem center]. Voronezh: Izd-vo Voronezh. un-ta, 1963. 211 p.
5. Vengerov P.D. Ptitsy Voronezhskoy oblasti: annotirovannyi spisok. [Birds of Voronezh region: annotated list]. Voronezh: Nauka-Yunipress, 2020. 160 p. ISBN 978-5-9908961-8-1.
6. Zakharova N.Yu. Lesnye mikrofragmenty kak mestoobitaniya ptits v agrolandshaftakh Verkhnego Dona. [Forest microfragments as bird habitats in the Upper Don agricultural landscapes]. In: *Ekologiya i okhrana ptits v agrolandshaftakh*. [Ecology and conservation of birds in agricultural landscapes]. Ryazan, 1999. P. 42-46.
7. Sokolov A.Yu. Fauna i naselenie ptits Voronezhskoy oblasti: sovremennoe sostoyanie i dinamika. [Bird fauna and population of Voronezh region: current state and dynamics]. *Ornitologiya = Ornithology*. 2007;(34):112-128.
8. Sokolov A.Yu., Lapshin A.S., Vengerov P.D. Sinantropizatsiya ptits Tsentral'nogo Chernozem'ya. [Synanthropization of birds in the Central Chernozem region]. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal = Russian Ornithological Journal*. 2021;30(2105):3879-3894.
9. Sokolov A.Yu., Shmygalev A.V. Novye vidy ptits v faune Voronezhskoy oblasti v XXI veke. [New bird species in the fauna of Voronezh region in the 21st century]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2016;(1):102-107.
10. Semago L.L. Sipukha v Voronezhskoy oblasti. [Barn owl in Voronezh region]. *Ornitologiya = Ornithology*. 1964;(6):487.
11. Sokolov A.Yu., Vengerov P.D. Sipukha (*Tyto alba*) – novyy gnezdyshchiysya vid fauny Voronezhskoy oblasti. [Barn owl (*Tyto alba*) – a new breeding bird species of the Voronezh region fauna]. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal = Russian Ornithological Journal*. 2021;30(2096):3065-3068.
12. Sokolov A.Yu., Vengerov P.D., Shmygalev A.V. Dlinnokhvostaya neyasyt' (*Strix uralensis*) – novyy gnezdyshchiysya vid Voronezhskoy oblasti. [Ural owl (*Strix uralensis*) – a new breeding bird species of Voronezh region]. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal = Russian Ornithological Journal*. 2019;28(1824):4567-4570.
13. Pukinskiy Yu.B. Zhizn' sov. [Life of owls]. Leningrad: Izd-vo LGU, 1977. 240 p.
14. Gavrilov E.I. Fauna i ekologiya sov Kazakhstana. [Fauna and ecology of owls of Kazakhstan]. Alma-Ata: Nauka, 1970. 214 p.

15. Morozov V.V., Sharikov A.V. Bolotnaya sova (*Asio flammeus*) v Evropeyskoy Rossii: rasprostranenie i dinamika chislennosti. [Short-eared owl (*Asio flammeus*) in European Russia: distribution and population dynamics]. *Ornitologiya = Ornithology*. 2018;(42):58-68.
16. Shepel' A.I. Sovy Permskogo kraia: ekologiya, rasprostranenie, okhrana. [Owls of Perm Krai: ecology, distribution, conservation]. Perm': ООО «Топография «Книжный мир», 2015. 180 p. ISBN 978-5-9907216-2-9.
17. Koblik E.A., Arkhipov V.Yu., Mosalov A.A. Sinantropizatsiya ptits Rossii: osnovnye napravleniya i prichiny. [Synanthropization of birds in Russia: main trends and causes]. *Trudy Zoologicheskogo muzeya MGU = Proceedings of the Zoological Museum of Moscow State University*. 2019;57:124-148.
18. Galushin V.M., Bukreev S.A., Simochkin P.V. Khishchnye ptitsy i sovy Evropeyskoy Rossii: sovremennoe sostoyanie populyatsiy. [Birds of prey and owls of European Russia: current population status]. Moscow: Soyuz okhrany ptits Rossii, 2017. 120 p.
19. Karyakin I.V. Filin (*Bubo bubo*) v Povolzh'e i na Urale: rasprostranenie, chislennost', limitiruyushchie faktory. [Eagle owl (*Bubo bubo*) in the Volga region and the Urals: distribution, abundance, limiting factors]. *Pernatye khishchniki i ikh okhrana = Raptors and Their Conservation*. 2012;(24):36-51.
20. Il'yukh M.P., Khokhlov A.N. Sovy Stavropol'skogo kraia i sopredel'nykh territoriy. [Owls of Stavropol Krai and adjacent territories]. Stavropol': Izd-vo SGU, 2009. 100 p.
21. Volkov S.V., Grishankov A.V., Ktitorov P.S. Rasshirenie areala dlinnokhvostoy neyasyti (*Strix uralensis*) v evropeyskoy chasti Rossii. [Range expansion of the Ural owl (*Strix uralensis*) in European Russia]. *Russkiy ornitologicheskii zhurnal = Russian Ornithological Journal*. 2018;27(1574):1015-1022.
22. Dement'ev G.P., Gladkov N.A. Ptitsy Sovetskogo Soyuza. [Birds of the Soviet Union]. Vol. 1. Moscow: Sovetskaya nauka, 1951. 652 p.

Сведения об авторах

Яковенко Наталья Владимировна – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и института инновационных технологий и лесного комплекса 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>, n.v.yakovenko71@gmail.com.

Турчанинова Елена Викторовна – старший преподаватель кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1800-240X>, misstur@yandex.ru.

About the authors

Nataliya V. Yakovenko – Doctor of Geography, Professor, Chief research officer of the division's Directorate of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex of the Voronezh State University Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>, n.v.yakovenko71@gmail.com.

Elena V. Turchaninova – Senior Lecturer Department of Ecology, Forest Protection and Game Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1800-240X>, misstur@yandex.ru.

Модальный анализ колебаний ветвей древесной растительности с учетом динамики режущего ротора

Леонид Д. Бухтояров✉, vglt-a-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

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

Представлены результаты исследования, направленного на обоснование рабочей высоты ротора кустореза. Для описания отклика ветви использована модель, основанная на уравнениях Эйлера–Бернулли с проекцией импульсной силы, на модальные формы, которая описывает распределение энергии и максимальные смещения в зависимости от импульса, длительности удара, геометрии ветви и точки приложения x_0 . Получены аналитические выражения собственных частот и форм колебаний, формулы для расчета модальной энергии и зависимости энергии колебаний и отклонения ветви от импульса удара, и высоты его приложения к ветви, позволяющие связать параметры ротора – частоту вращения, массу, расстояние лезвия от оси ротора с ожидаемыми колебаниями и изломом ветви. Для ветви длиной 1,5 м и диаметром 0,01 м получены собственные частоты первых пяти форм колебаний 2,91; 17,34; 48,25; 94,51 и 156,17 Гц. Для верификации модального анализа выполнен частотный анализ в САПР, расхождение собственных частот для первых пяти мод менее 1%. Разработана модель гидропривода ротора с учетом его инерционных параметров, и изменения давления в напорной гидромагистрале. Установлено, что при резании ветвей диаметром 10...30 мм в первую очередь, расходуется энергия от инерции маховика, которую восстанавливает привод в промежутках между ударами. Полученные теоретические значения давления при резании ветвей сопоставлены с результатами экспериментальных исследований на опытном образце ротора кустореза. Установлено, что модель гидропривода удовлетворительно описывает изменение давления в гидросистеме. Показано, что наиболее рациональной является высота резания 0,2...0,4 м. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании кусторезов и выборе параметров их рабочих органов. Ограничения модели: линеаризация, необходимость калибровки параметров для разных пород древесины.

Ключевые слова: ротор кустореза, математическое моделирование, модальный анализ, удар лезвием, ветвь, распределение энергий по модам, системы автоматизированного проектирования (САПР)

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Благодарности: Автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бухтояров, Л. Д. Модальный анализ колебаний ветвей древесной растительности с учетом динамики режущего ротора / Л. Д. Бухтояров // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 171–182. – Библиогр.: с. 180–182 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/11>.

Поступила 16.03.2026. *Пересмотрена* 25.04.2026. *Принята:* 15.05. 2026. *Опубликована онлайн* 26.06.2026

Article

Modal analysis of oscillations of tree vegetation branches taking into account the dynamics of the cutting rotor

Leonid D. Bukhtoyarov✉, vglt-a-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

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

Abstract

The article presents the results of a study aimed at substantiating the working height of a brush cutter rotor. To describe the branch response, a model based on the Euler–Bernoulli equations with the projection of the impulse force

onto modal forms was used, which describes the energy distribution and maximum displacements depending on the impulse, impact duration, branch geometry, and the point of application x_0 . Analytical expressions for natural frequencies and vibration modes, formulas for calculating the modal energy and the dependence of the oscillation energy and branch deviation on the impact impulse and the height of its application to the branch were obtained. These formulas make it possible to relate the rotor parameters - rotation frequency, mass, blade distance from the rotor axis - with the expected oscillations and branch fracture. For a branch 1.5 m long and 0.01 m in diameter, the obtained natural frequencies of the first five vibration modes were 2.91; 17.34; 48.25; 94.51 and 156.17 Hz. To verify the modal analysis, a frequency analysis was performed in CAD; the deviation of natural frequencies for the first five modes is less than 1%. A model of the rotor hydraulic drive was developed, taking into account its inertial parameters and pressure changes in the pressure hydraulic line. It was found that when cutting branches with a diameter of 10...30 mm, the energy from the flywheel inertia is primarily consumed, which is restored by the drive between blows. The obtained theoretical values during branch cutting are compared with the results of experimental studies on a prototype brushcutter rotor. It was found that the hydraulic drive model satisfactorily describes the pressure changes in the hydraulic system. The most rational cutting height is shown to be 0.2...0.4 m. The obtained results can be used in the design of brushcutters and the selection of the parameters of their working tools. Limitations of the model: linearization, the need for calibration of parameters for different wood species.

Keywords: *brush cutter rotor, mathematical modeling, modal analysis, blade impact, branch, energy distribution by modes, computer-aided design (CAD) systems*

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation №25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>

Acknowledgement: 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: Bukhtoyarov L. D. (2026) Modal analysis of oscillations of tree vegetation branches taking into account the dynamics of the cutting rotor. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 171-182 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/11>.

Received 16.03.2026. **Revised** 25.04. 2026. **Accepted** 15.05. 2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

При разработке кусторезов, мульчеров и машин для расчистки лесных площадей важно обосновать высоту приложения ударного воздействия ножей ротора на ветви и стволы, чтобы обеспечить эффективное разрушение древесины при оптимальных энергозатратах поэтому необходимо глубокое понимание взаимодействия рабочих органов машин с древесной растительностью. Традиционные подходы основаны на эмпирическом подборе режимов работы кусторезов, однако методы модального анализа позволяют предсказывать динамический отклик древесных стеблей на импульсное воздействие роторов [1, 2, 3, 4].

Для анализа крупномерных деревьев актуальны вопросы их структурной безопасности при различных нагрузках, так Pang et al. (2025) [5] применили метод конечных элементов для анализа деревьев под действием сил тяжести, ветра и снега, показав, что снеговая нагрузка контролирует критические напряжения (13,63 МПа в наихудшей ветви), а подпорные конструкции снижают перемещения на 30...42% и напряжения на 84...92% [5]. Zhuang et al. (2023) [6] разработали расчётную схему для прогноза разрушения деревьев воздушной волной от оползней, установив, что резонанс между

собственной частотой дерева и частотой нагрузки приводит к динамическому усилению прогиба при слабых потоках, тогда как при сильных, нелинейные эффекты ослабляют отклик [6]. Moravčík et al. (2021) [7] использовали подход с наземным лазерным сканированием, акустическую томографию и методы конечных элементов (FEM) для статического анализа липы, выявив критичные узлы с прогибом 280,4 мм и пределом прочности на растяжение 23,6 МПа [7]. Karlinasari et al. (2023) сопоставили три метода оценки потери устойчивости стоящих деревьев под собственным весом, установив, что формула Эйлера – Илинена является наиболее подходящей для данного случая и рассчитали соответствующие распределения категорий безопасности деревьев [8]. Эти работы демонстрируют важность учёта статических и динамических граничных условий, анизотропии и геометрической нелинейности при моделировании деревьев.

Анализируя взаимодействие режущих рабочих органов с молодыми деревьями, их ветвями и древесно-кустарниковой растительностью можно заметить, что актуальными являются вопросы влияния собственных частот и высоты среза на процесс взаимодействия с рабочим органом. Aiso et al. (2025) [9] оценили скорость стресс-волн у

6-летних растений (*Rubroshorea*, *Leprosula*, *R. Macrophylla*), установив среднюю скорость волны 3,80 км/с для обоих видов [9]. Значительный объём исследований посвящён вибрационному сбору плодов с целью оптимизации частоты, амплитуды и точки приложения возбуждения. Lin Sun (2021) [10] показали, что гармонический отклик ветвей (*Ginkgo biloba*) усиливается вблизи резонансных частот, причём стволное возбуждение неэффективно, а частотные спектры существенно различаются между ветвями, что затрудняет одночастотный сбор [10]. Niu et al. (2022) [11] объединили конечно-элементный анализ в SolidWorks с виброиспытаниями оливы в диапазоне 10...30 Гц, рекомендуя возбуждение боковой ветви силой 5220 Н при 25 Гц для эффективного отделения плодов [11]. Yu et al. (2023) [12] продемонстрировали сильную зависимость эффективности режимов вибросбора от диаметра ствола, оптимальные параметры составили 30 Гц для диаметра 30 мм, 18,55 Гц для диаметра 50 мм и 6 Гц для диаметра 70 мм [12]. Zhang et al. (2023) [13] исследовали многонаправленный отклик винограда, установив максимальные амплитуды 27,10 мм по оси Z и повышенное осыпание в верхней правой зоне грозди [13]. Wang et al. (2024) [14] для камелии масличной определили оптимальный диапазон 4...8 Гц и 50 Н [14]. Sun et al. (2023) [15] показали, что при 3 Гц и 20 мм сила отделения яблок достигает 18,71 Н, превышая связующую силу [15]. Ma et al. (2022) [16] ввели индекс положения λ и коэффициенты для описания затухания энергии в кроне фисташки, показав универсальное падение силы по мере удаления от точки захвата [16]. Из этих работ следует, что эффективность вибросбора определяется согласованием частоты возбуждения с модальными характеристиками системы плод – ветвь, что релевантно и для механизированной работы кусторезов, у которых импульсное возбуждение от ротора должно максимально возбуждать моды, ответственные за изгибные напряжения ветвей для их излома.

Модальный анализ позволяет определить параметры ветвей и то, как они реагируют на внешнее воздействие. Grande et al. (2023) [1] предложили метод, который заключается в аппроксимации динамической реакции ветви, вызванной свободными колебаниями, представляя ветвь как вязко-демпфированную систему с одной степенью свободы (SDOF), после чего валидировали результаты методом конечных элементов [1]. Bilir et al. (2023) [17] выполнили модальное исследование алюминиевой консольной балки с достижением средней ошибки частот 1,5%, также проведя верификацию конечно-элементной моделью [17]. Chau et al. (2022) [2] применили многолучевой сканер (LiDAR) для реконструкции 3D – движений фикуса мелкоплодного (*Ficus microcarpa*), получив

расхождение с измерениями индуктивными датчиком линейных перемещений (LVDT) первых двух модальных частот 0,1% и 2,5%, и выявив, что широколиственные деревья вибрируют в широком диапазоне, а хвойные имеют доминирующую частоту [2]. Jiang и Jiang (2021) [3] расширили методы операционного модального анализа (ОМА) на нелинейные системы посредством символической регрессии, автоматически отыскивающей структуру нелинейных нормальных мод без априорных предположений [3]. Перечисленные методы позволяют проводить модальный анализ и валидацию его результатов и могут быть применимы при обосновании параметров кусторезов, воздействующих на древесно-кустарниковую растительность.

Классические аналитические решения уравнений Эйлера–Бернулли служат основой для понимания модального поведения консольных стеблей. Барагунова и др. (2024) [18] рассмотрели свободные и вынужденные колебания балок переменного сечения под распределённой нагрузкой, вывели спектр собственных частот и форм с применением принципа Д'Аламбера, показав зависимость амплитуды от близости частоты возмущения к собственным значениям. Эта теоретическая база позволяет предсказывать, какие моды возбуждаются ударом в конкретной точке через проекцию силы на модальные формы, и связывать начальную модальную энергию с импульсом удара [18].

Ряд исследований сфокусирован на динамике резания ветвей, что дополняет понимание взаимодействия ножей с древесиной. Toleu и Liu (2024) [19] оценили требуемую удельные силу и энергию резания мискантуса при скоростях ножа 8,2...11,3 м/с, установив максимумы 511 Н/см² и 10,5 Дж/см² для ножа, причём тип ножа и положение по стеблю существенно влияют на удельные показатели [19]. Kumar et al. (2024) [20] показали, что сила резания убывает с ростом скорости ножевой балки и возрастает с поступательной скоростью, а выбор геометрии лезвия снижает энергопотребление на 18–30% [20]. Nowakowski и Tucki (2025) [21] разработали модель затрат удельной энергии резания ивы с учётом влажности и угла резания, которая может быть использована для оптимизации режущих узлов кусторезов [21]. Драпалюк М.В. и др. (2023) [4] экспериментально определили мощностные характеристики шарнирно-сочлененного и ножевого роторных рабочих органов кустореза, установив, что работа резания на минимальных оборотах (1000 об/мин) составляет 960...1062 Дж, а на максимальных (2500 об/мин) 1600...2500 Дж, причём тонкое шарнирное лезвие даёт срез без раскола, однако не обосновали выбор высоты удара с позиции модальных свойств ветви [21]. Бухтояров Л.Д. и др. (2025) [22]

разработали методику экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) балок кустореза методом вокселизации и регулярной HEX8-сетки, позволяя отбраковывать конструкции по глобальным метрикам жёсткости и напряжений, однако сосредоточились на прочности рамы, а не на режимах нагружения ветвей [22]. Эти работы подчёркивают, что помимо модального отклика необходимо учитывать кинематику и геометрию режущих элементов для комплексного обоснования рабочей высоты кустореза.

Следует также отметить работы Фоминой О.А. и Фокина С.В. изложенные в монографии [23], они исследовали конструкцию и рабочий процесс рубительных машин, разработали математическую модель выброса щепы и обосновали рациональные конструктивно-технологические параметры узлов машины. Сиваков В.В. и Заикин А.Н. показали, что повышение эффективности лесозаготовительных машин связано с цифровым моделированием режимов работы, учетом условий эксплуатации и мониторингом технического состояния техники [24]. Абдразаков Ф.К. и Кузнецов В.А. на основе полевых исследований оросительных каналов установили диапазоны диаметров, высот, густоты стояния и углов наклона древесно-кустарниковой растительности, а также обосновали необходимость автоматического регулирования высоты рабочего органа и усиления режущей системы кустореза [25].

Анализ литературы показывает, что вибрационная динамика деревьев достаточно подробно изучена главным образом в задачах механизированного сбора плодов, а методы модального анализа успешно применяются для оценки колебательного состояния и структурной устойчивости древесных систем. Вместе с тем применительно к кусторезам вопросы импульсного отклика ветвей при ударном воздействии ножа исследованы недостаточно. В частности, в литературе практически не раскрыта связь между высотой приложения удара, модальной структурой изгибных колебаний ветви и условиями ее разрушения. Исследования процесса резания стеблей и ветвей в основном сосредоточены на удельной энергии резания, геометрии лезвия и режимных параметрах, однако не рассматривают возможность обоснования высоты удара с позиций модального отклика системы. Настоящая работа заполняет этот пробел, предлагая пятимодальную модель на основе уравнений Эйлера – Бернулли с проекцией импульсной силы на модальные формы, и устанавливая масштабные зависимости энергии и смещений от импульса J , длительности удара t_c , геометрии ветви L , D и точки приложения x_0 .

Цель исследования – обосновать с использованием модального анализа, рациональную высоту ротора кустореза, а также оценить энергетические и динамические параметры ротора,

включая работу резания и изменение давления в гидросистеме, для проверки реализуемости рекомендуемого режима срезания.

Материалы и методы

Представим ветвь как тонкую балку, заделанную концом в грунте. В рассматриваемых случаях отношение длины ветви к её диаметру значительно больше единицы, то есть поперечные размеры малы по сравнению с продольным, поэтому примем допущение что диаметр ветви в модели имеет постоянное сечение. В таком случае уравнение свободных поперечных колебаний найдем, используя теорию Эйлера-Бернулли по формуле:

$$\frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

где $w(x, t)$ – прогиб балки в точке x в момент времени t , м; E – модуль Юнга (модуль упругости) материала балки, Па; I – осевой момент инерции поперечного сечения балки относительно нейтральной оси, м⁴; ρ – плотность материала балки, кг/м³; A – площадь поперечного сечения балки, м²; L – длина балки, м.

При ударе сила $F(t)$ прикладывается в конкретной точке ветви $x = x_0$. Такое кратковременное воздействие мгновенно возбуждает все моды колебаний, но в разной степени. Чтобы понять, какая мода сколько энергии получит, силу $F(t)$ нужно спроецировать на каждую модальную форму $\phi_n(x)$. Проекция силы на n – ю моду (модальная сила) определим по формуле:

$$F_n(t) = F(t) \phi_n(x_0), \quad (2)$$

Силу ударного контакта F нож-ветвь с мгновенной деформацией найдем по формуле $F = K_c u$, где F – сила удара, Н; u – относительная мгновенная деформация, в месте удара, м; K_c – коэффициент упругости (жесткость) в зоне контакта (по Герцу), Н/м.

В этом случае каждая мода чувствует только ту часть силы, которая совпадает с её формой в точке удара. Если $\phi_n(x_0) = 0$ (узел моды), то удар не возбуждает эту моду вообще. Если удар очень короткий ($t_c \ll 1/\omega_n$), то систему можно считать не возбужденной за время удара – смещения q_n не успевают измениться, только скорости $\dot{q}_n$ возрастают скачком. Для случая, когда ветвь до удара находилась в состоянии покоя, получим:

$$\dot{q}_n(0^+) = \frac{J \phi_n(x_0)}{M_n}, \quad (3)$$

После удара каждая мода получает начальную скорость $\dot{q}_n(0^+)$ и, следовательно, начальную кинетическую энергию, подставив скорость получим:

$$E_n(0^+) = \frac{1}{2} M_n \dot{q}_n^2(0^+) = \frac{J^2 \phi_n^2(x_0)}{2 M_n}, \quad (4)$$

где $E_n(0^+)$ – энергия n -й моды непосредственно после удара, Дж; J – импульс удара, Н·с; M_n – модальная масса, кг.

Модальная масса зависит от формы колебаний и может быть определена через интеграл по длине балки. Для упрощения расчета примем допущение, что модальная масса равна массе эквивалентной однородной ветви постоянного сечения. Модальную массу найдем по формуле:

$$M_n \approx \rho \frac{\pi D^2}{4} L. \quad (5)$$

Максимальное смещение от одной моды найдем по формуле:

$$y_{max,n} = \frac{J \cdot \phi_n^2(x_0)}{M_n \cdot \omega_n}, \quad (6)$$

где $y_{max,n}$ – максимальное смещение от n -й моды в точке удара, м; $\omega_n = 2\pi f_n$ – круговая частота n -й моды, рад/с.

Для многомодальной оценка смещения используем метод энергетически взвешенного суммирования для значимых мод $E_{n,\%} > 5\%$.

$$y_{max,multi} = \frac{\sum_{n \in S} E_{n,\%} \cdot y_{max,n}}{\sum_{n \in S} E_{n,\%}}, \quad (7)$$

где $y_{max,multi}$ – многомодальная оценка максимального смещения, мм; S – множество

индексов значимых мод; $E_{n,\%}$ – процентная доля энергии n -й моды, %.

Доля энергии моды:

$$E_{n,\%} = \frac{E_n(0^+)}{\sum_{k=1}^N E_k(0^+)} \times 100\%, \quad (8)$$

Таким образом рассчитаем, как импульс J распределяет энергию между модами в зависимости от положения удара ($\phi_n(x_0)$), и модальной массы (M_n).

Воздействие на ветвь осуществляется со стороны ротора с ножами.

Для оценки просадки оборотов, пиков мощности и энергетических показателей используем трёхмассовую модель: двигатель – маховик – ротор. Нагрузкой является момент резания, который рассчитаем, как силу резания на радиусе ротора. Для линейного упругого удара сила равна:

$$F_{max} = \omega_r R \sqrt{K_c m_{eq}}, \quad (9)$$

где F_{max} – максимальная сила контактного взаимодействия, Н; K_c – контактная жёсткость нож-ветвь, Н/м; m_{eq} – приведённая масса системы нож-ветвь, кг; ω_r – угловая скорость ротора, рад/с; R – плечо силы, м.

Система уравнений движения примет вид:

$$\begin{cases} I_m \dot{\omega}_m = T_{mot}(\omega_m) - K_{mf}(\theta_m - \theta_f) - C_{mf}(\omega_m - \omega_f) - B_m \omega_m, \\ I_f \dot{\omega}_f = K_{mf}(\theta_m - \theta_f) + C_{mf}(\omega_m - \omega_f) - K_{fr}(\theta_f - \theta_r) - C_{fr}(\omega_f - \omega_r) - B_f \omega_f, \\ I_r \dot{\omega}_r = K_{fr}(\theta_f - \theta_r) + C_{fr}(\omega_f - \omega_r) - M_{cut}(t) - B_r \omega_r, \end{cases} \quad (10)$$

где I_m, I_f, I_r – моменты инерции мотора, маховика и ротора, кг·м²; K_{mf} – торсионная жёсткость мотор-маховик, Н·м/рад; C_{mf} – вязкое демпфирование мотор-маховик, Н·м·с/рад; B_m, B_f, B_r – вязкие потери на моторе, маховике и роторе, Н·м·с/рад; $\theta_m, \theta_f, \theta_r$ – углы положения мотора, маховика и ротора, рад; $\omega_m, \omega_f, \omega_r$ – угловые скорости мотора, маховика и ротора, рад/с; T_{mot} – движущий момент мотора, Н·м; $M_{cut}(t)$ – момент сопротивления импульсному резанию, Н·м;

Интегрирование системы (10), описывающей динамику гидропривода, выполним численно по явной схеме Эйлера используя язык Python в среде PyCharm.

Энергию, затрачиваемую при резании на одну ветвь, найдем через удельную энергию резания u_{spec} и объём разрушения по формуле:

$$E_{cut} = u_{spec} A l_{cut}, \quad (11)$$

где E_{cut} – энергия резания одной ветви, Дж; u_{spec} – удельная энергия резания, Дж/м³; $A = \pi d^2/4$ – площадь сечения ветви, м²; l_{cut} – эффективная длина активного резания вдоль подачи, м.

Работу, затраченную на резание, найдем по формуле:

$$W_{cut}(t) = \int_0^t M_c(t) \omega_s(t) dt, \quad (12)$$

где $W_{cut}(t)$ – работа, затраченная на резание к моменту времени t , Дж; t – время, с; $M_c(t)$ –

суммарный момент сопротивления резанию во времени, Н·м; $\omega_s(t)$ – угловая скорость рабочего органа во времени, рад/с.

Энергия, запасённая во вращающихся массах

$$E_{fly}(t) = \frac{1}{2} I_f \omega_f^2(t), \quad (13)$$

где $E_{fly}(t)$ – кинетическая энергия, запасённая во вращающихся массах к моменту времени t , Дж; I_f – момент инерции маховика, кг·м²; $\omega_f(t)$ – угловая скорость маховика, рад/с.

Для привода ротора используем гидромотор. Систему уравнений движения дополним уравнением динамики давления в напорной магистрали, на основе уравнения неразрывности для эквивалентного сжимаемого объёма. В этой постановке скорость изменения давления пропорциональна суммарному дисбалансу расходов (подача насоса минус расход через гидромотор и утечки с учётом подпитки), приведённому к

податливости гидролинии K_{line} . Запишем соответствующее уравнение в дифференциальной форме:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{Q_{pump}(t) - Q_m(t) - Q_{leak}(t) + Q_{charge}(t)}{K_{line}}, \quad (14)$$

где $p(t)$ – давление в напорной магистрали, Па; dp/dt – скорость изменения давления, Па/с; Q_{pump} – подача насоса, м³/с; Q_m – расход через гидромотор, м³/с; Q_{leak} – утечки, м³/с; Q_{charge} – подпитка, м³/с; K_{line} – коэффициент податливости эквивалентного гидрообъёма, м³/Па.

Таким образом, с одной стороны мы определяем энергетические параметры ротора, а с другой энергию колебаний ветви.

Ограничения модели. При проведении модального анализа ветвь рассматривается как однородная консольно закреплённая балка Эйлера–Бернулли постоянного сечения. В модели не учитываются анизотропия древесины, конусность, сучки, дефекты, локальные повреждения и геометрическая нелинейность. Удар ножа задаётся как кратковременное импульсное воздействие, а расчёт выполняется по ограниченному числу форм колебаний. Установим пороги по прогибам: для $u_{max} < 0,3L$ модель соответствует упругим колебаниям ветви, для величин $0,3L < u_{max} < L$ начало разрушения, при превышении предела пластических деформаций, если $u_{max} > L$ то ветвь гарантированно сломается от изгиба, так изгиб не может быть больше чем её длина. Рассматриваем только первые пять мод. При расчете параметров ротора формула контактной силы не учитывает пластическое смятие, трещинообразование, трение, затупление лезвия и изменение площади контакта, контакт ножа с ветвью рассматривается в

п, об/мин п, rpm	V, м/с V, m/s	J, Н·с J, N·s	F _{max} , Н F _{max} , N
1000	15,71	1,571	3142
2000	31,42	3,142	6283
3000	47,12	4,712	9425

упрощённой линейно-упругой постановке. Расчёт энергии и работы резания основан на предположении о постоянстве удельной энергии разрушения и эффективной длины активного резания. Получаемые значения следует рассматривать как инженерные оценки, пригодные для сравнительного анализа режимов, но не как универсальные константы процесса. Модель гидропривода является сосредоточенной и использует эквивалентный сжимаемый объём и коэффициент податливости гидролинии, но не учитываются волновые процессы в трубопроводах, локальные гидравлические сопротивления, и нелинейность характеристик элементов системы.

Результаты и их обсуждение

Параметры расчета первых пяти мод: диаметр ствола $D=0,01$ м; длина ствола $L=1,5$ м; модуль Юнга осины $E = 8,4 \cdot 10^9$ Па; плотность осины $\rho = 430$ кг/м³. Для первых пяти мод получим соответственно 2,91; 17,34; 48,25; 94,51; 156,17 Гц.

Вычислительный эксперимент.

Численное решение модальных уравнений движения ветви, полученных на основе уравнения (1), для первых пяти форм колебаний выполним методом Рунге – Кутты 4(5)-го порядка на языке Python в среде PyCharm. Временной интервал моделирования $t=0...0,03$ с; шаг по времени $\Delta t=0,0001$ $m_l = 0,1$ кг; $R_l = 0,15$ м; $\zeta_n=0.02$. Машинное время расчёта не превышало 30 с. Вычисления выполнялись на персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 5 5600X, 64 ГБ оперативной памяти, под управлением ОС Windows 11.

Таблица 1

Константы трех серий опытов

Table 1

Constants of three series of experiments

Серия опытов Experim ental Series	Длина L, м Lengt h L, m	Диаметр D мм Diamete r D, mm	Жёсткость EI, Нм ² Stiffness EI Nm ²	Масса, кг Massa kg
1	1,5	10	0,0413	0,0506
2	2	15	0,209	0,152
3	3	20	0,661	0,406

Источник: собственный расчет автора
Source: authors' own calculations

Таблица 2

Константы опытов по оборотам

Table 2

Constants of experiments on revolutions

Источник: собственный расчет автора
Source: authors' own calculations

Проведём 27 численных экспериментов (три длины и соответствующие им диаметры ветвей × три высоты удара × три частоты вращения ротора). Высоту удара x_0 варьировали, принимая значения 0,2; 0,4 и 1,0 м. Параметры эксперимента сведены в таблицы 1...2.

Создадим 3D модель ветви, закрепим её у основания и выполним частотный анализ в САПР, результаты показаны на рисунке 1.

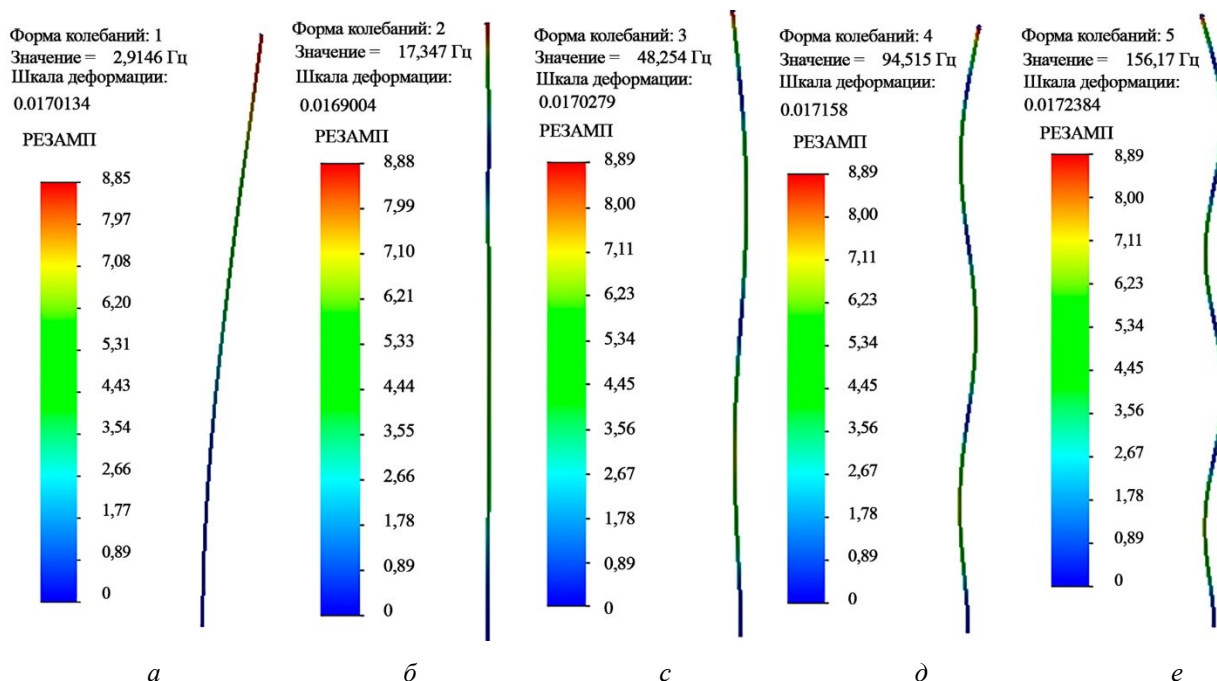


Рисунок 1. Рассчитанные в САПР моды для ветви высотой 1,5 м и диаметром 20 мм: а – первая мода 2,91 Гц, б – вторая мода 17,3 Гц, с – третья мода 48,2 Гц, д – четвертая мода 94,5 Гц, е – пятая мода 156,2 Гц

Источник: собственный расчет автора

Figure 1. CAD-calculated modes for a branch 1.5 m high and 20 mm in diameter: a – first mode 2.91 Hz, b – second mode 17.3 Hz, c – third mode 48.2 Hz, d – fourth mode 94.5 Hz, e – fifth mode 156.2 Hz

Source: authors' own calculations

Основные параметры расчета резания ветви. Рабочий орган: масса ротора $m_r = 11,5$ кг, масса лезвия $m_l = 0,1$ кг, радиус ротора $R_r = 0,15$ м, частота вращения $n=1000$ об/мин. Коэффициенты: $I_m=0,02$ кг·м², $K_{mf} = 8000$ Н·м/рад, $C_{mf} = 2$ Н·м·с/рад, $K_{fr} = 3 \cdot 10^4$ Н·м/рад, $C_{fr} = 5$ Н·м·с/рад, $B_m = 0,05$, $B_f = 0,02$, $B_r = 0,05$ Н·м·с/рад. Значения коэффициентов демпфирования и вязких потерь выбирали из условия обеспечения соответствия расчётной динамики по данным эксперимента.

Контакт с ветвью: приведенный модуль $E=3,5 \cdot 10^9$ Па, толщина ножа $b=0,04$ м, удельная энергия резания $u_{spec} = 10$ Дж/см³.

Зависимость изменения энергий резания и энергий на маховике для диаметров ветвей 10...30 мм показана на рисунке 2.

Полученный характер зависимостей подтверждает, что в рассматриваемом режиме пики нагрузки преимущественно покрываются запасом энергии вращения, тогда как двигатель выполняет роль источника, восстанавливающего этот запас между последовательными актами резания.

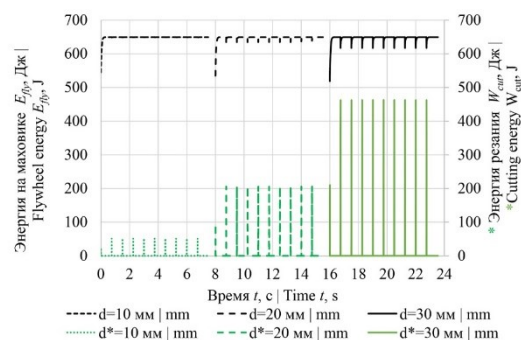


Рисунок 2. Энергия на маховике и энергия резания

Источник: собственный расчет автора

Figure 2. Flywheel energy and cutting energy

Source: authors' own calculations

Параметры расчета динамики гидропривода ротора: $T_{imp} = 0.4$ мс, $T_{start} = 0.80$ с, $Q_m = 32$ см³/об, $\eta_m=0.90$, $p_0=1$ МПа, $Q_0=32.0$ л/мин. Ветви 3×10 мм, 3×20 мм, 4×30 мм, шаг=1 м, $dt=0.100$ мс, $T=30.0$ с. При старте наблюдается гидроудар и далее процесс резания который влияет на напорное давление в гидромагистрали, рисунок 3.

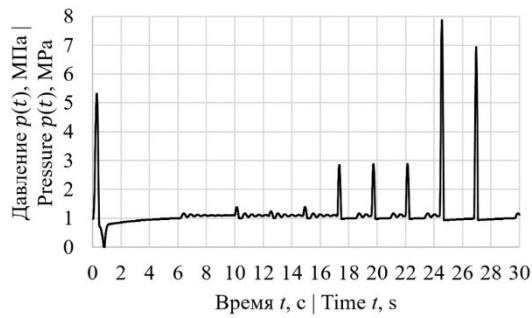
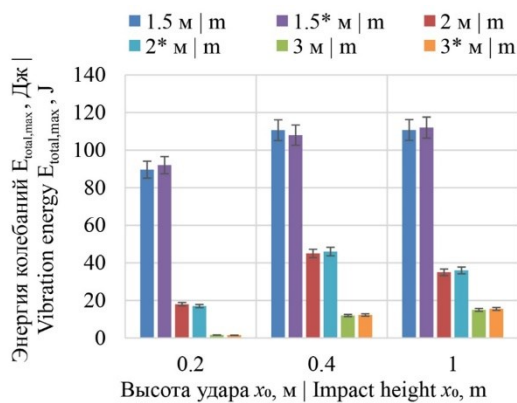


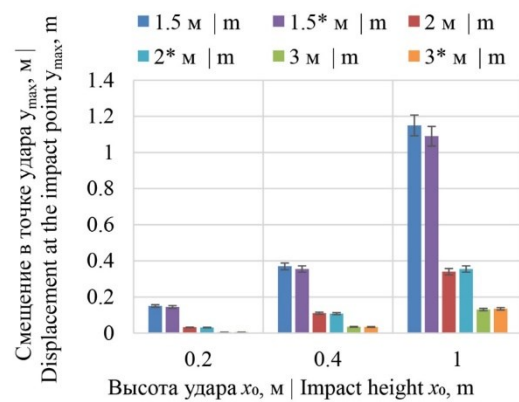
Рисунок 3. Изменение давление в гидросистеме

Источник: собственный расчет автора
Figure 3. Pressure change in the hydraulic system

Source: authors' own calculations



а



б

Рисунок 4. Сравнение аналитических (*) и численных результатов с учетом разной высоты ветви и разного уровня ударов: а – энергия колебаний; б – величина смещения

Источник: собственный расчет автора

Figure 4. Comparison of analytical (*) and numerical results taking into account different branch heights and different impact levels: a – vibration energy; b – displacement value

Source: authors' own calculations

Верификация результатов

После обработки всех 27 опытов модального анализа сведем результаты в виде диаграмм, показанных на рисунке 4. Сравним результаты собственных частот первых пяти мод, полученных двумя независимыми методами – частотным анализом в САПР на основе конечно-элементной 3D модели ветви (см. рисунок 1) и аналитическим по формуле Эйлера-Бернулли (1) с использованием безразмерных частотных параметров $\beta_n L$ (см. рисунок 2).

Отличия в результатах по всем пяти модам менее 1%, что свидетельствует о корректности граничных условий в САПР модели, достаточной точности конечно-элементной сетки для воспроизведения аналитического решения, правильности параметров E, ρ в обоих подходах, и применимости теории Эйлера-Бернулли для данной задачи.

Для верификации расчетного давления в напорной магистрали разработаем опытный образец роторного кустореза. Для расширения возможностей снятия показаний сил резания установим раму кустореза на тензонавеску. Режущий ротор с ножами 1 получает вращение от гидромотора 2 через подшипниковый узел 3. В напорной линии гидросистемы размещены манометр 4 и тензодатчик давления 5, позволяющие фиксировать изменение нагрузки в процессе резания. Подшипниковый узел установлен на раме 6, которая закреплена на навеске 7, жёстко соединённой с тензонавеской 8. Для визуального контроля процесса взаимодействия ножа с ветвью использованы две экшен-камеры 9. Такая установка ротора кустореза позволяет экспериментально определить нагрузки на роторе и сравнить их с результатами, полученными при расчёте по формулам динамики гидропривода.



Рисунок 5 Опытный образец ротора кустореза

Источник: собственное фото автора
Figure 5. Prototype of a brushcutter rotor
The authors' own photos

Сравнение максимальных значений давления полученных экспериментальных и теоретическим путем приведено на рисунке 6.

Технические характеристики манометра РОСМА диапазон 0...25 МПа, класс точности 1,5, тензодатчика давления ZET 315 диапазон 0...16 МПа, собственные шумы 10^{-5} от диапазона.

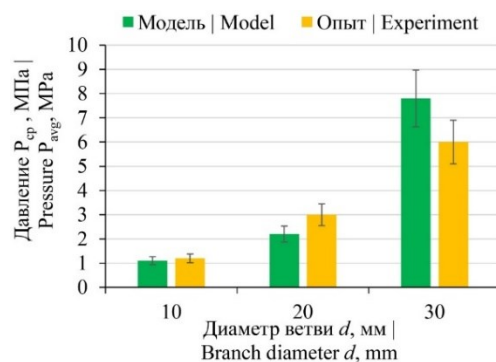


Рисунок 6. Верификация давления при резании

Источник: собственный расчет автора
Figure 6. Verification of cutting pressure
Source: authors' own calculations

Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных по трем диаметрам составило 21,7%, что свидетельствует об удовлетворительном согласовании с имитационной моделью. Расхождение обусловлено принятыми допущениями, влияние которых наиболее велико при повышении давления и срезании ветвей диаметром 30 мм.

Выводы

1. Установлено, что в рассматриваемом режиме резания пиковые энергозатраты в основном покрываются запасённой кинетической энергией ротора, тогда как двигатель преимущественно восполняет этот запас между последовательными актами резания.

2. В рамках принятой модели увеличение частоты вращения ротора приводит к росту энергии колебаний ветви; при увеличении частоты вращения с 1000 до 3000 об/мин расчётные значения энергии возрастают примерно в 9 раз.

3. По результатам модального анализа и 27 численных экспериментов установлено, что рациональной с точки зрения распределения энергии по модам является зона удара на расстоянии 0,2...0,4 м от основания ветви, где обеспечивается эффективное возбуждение изгибных форм колебаний и создаются наиболее благоприятные условия для её разрушения.

4. Разработана расчётная модель динамики роторного привода и гидросистемы, позволяющая оценивать изменение угловой скорости ротора и давления в напорной магистрали при старте и в процессе резания.

5. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений давления показало, что модель гидропривода удовлетворительно описывает общий уровень нагрузки в гидросистеме и может быть использована для инженерной оценки режима резания.

6. При применении модели к разным породам необходимо уточнять модуль упругости, плотность, влажность, контактную жёсткость и удельную

энергию резания, что определяет необходимость дальнейшей экспериментальной калибровки параметров модели.

Список литературы

1. Grande E., Giordano E., Clementi F. Evaluation of Dynamic Properties of Trees Subjected to Induced Vibrations. *Applied Sciences*. 2023; 13(12):7333. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127333>.
2. Chau W.Y., Cheng N.L., Yu-Hsing W., Chiu S.W., Tan T.J., Wu J., Leung M.L., Tan P.S., Ooi G.L. Understanding the Dynamic Properties of Trees Using the Motions Constructed from Multi-Beam Flash Light Detection and Ranging Measurements. *Journal of The Royal Society Interface*. 2022; 19(193). – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2022.0319>.
3. Jiang X., Jiang F. Operational modal analysis using symbolic regression for a nonlinear vibration system. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2020; 40(1):120-134. – DOI: <https://doi.org/10.1177/1461348420905172>.
4. Драпалюк М.В., Бухтояров Л.Д., Куницкая О.А., Прокудина А.В., Григорьева О.И., Отмахов Д.В. Изучение мощностных показателей и качества среза шарнирно-сочлененным и ножевым рабочими органами роторного кустореза // *Системы. Методы. Технологии*. – 2023. – Т. 2. – № 58. – С. 7-13. – DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-2-7-13>.
5. Pang S., Jung J.S., Lee G.G., Shin J.H., Son J.W. Finite element analysis of structural safety and support reinforcement efficacy in a large old Zelkova tree: A case study of a natural monument. *BioResources*. 2025; 20(4):8632-8653. – DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.20.4.8632-8653>.
6. Zhuang Y., Xing A., Bartelt P., Bilal M., Ding Z. Dynamic response and breakage of trees subject to a landslide-induced air blast. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2023; 23(4):1257-1266. – DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1257-2023>.
7. Moravčík L., Vincúr R., Rózová Z. Analysis of the Static Behavior of a Single Tree on a Finite Element Model. *Plants*. 2021; 10(7):1284. – DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10071284>.
8. Karlinasari L., Bahtiar E.T., Kadir A.S.A., Adzkie U., Nugroho N., Siregar I.Z. Structural Analysis of Self-Weight Loading Standing Trees to Determine Its Critical Buckling Height. *Sustainability*. 2023; 15(7):6075. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su15076075>.
9. Aiso H., Nezu I., Hidayati F., Irawati D., Wahyudi I., Ohkubo T., Ishiguri F. Growth characteristics, stress-wave velocity of stems, and radial variations of wood properties and anatomical characteristics in six-year-old *Rubroshorea leprosula* and *R. macrophylla* planted in Central Kalimantan, Indonesia. *J Wood Sci.* 2025; 71(7):1611-1663. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-025-02181-5>.
10. Lin H., Sun L. Vibration responses characteristics of a Ginkgo biloba tree excited under harmonic excitation. *PLOS ONE*. 2021; 16:e0256492. – DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256492>.
11. Zijie N., Zhang X., Juntao D., Jun Z., Shijia P., Haotian M. Optimal vibration parameters for olive harvesting from finite element analysis and vibration tests. *Biosystems Engineering*. 2022; 215:228-238. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.002>.
12. Yu C., Qiao Y., Feng J., Guo T., Luo W., Guo J., Hu Y. Optimization of Vibration Parameters for Red Jujube Trees with Different Diameters. *Forests*. 2023; 14(7):1287. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071287>.
13. Zhang P., Yan D., Cai X., Chen Y., Luo L., Pan Y., Zou X. Multidirectional Dynamic Response and Swing Shedding of Grapes: An Experimental and Simulation Investigation under Vibration Excitation. *Agronomy*. 2023; 13(3):869. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030869>.
14. Wang R., Fang D., Wu C., Wang B., Zhu H., Hu T., Wu D. Dynamic response of *Camellia oleifera* fruit-branch based on mathematical model and high-speed photography. *Biosystems Engineering*. 2024; 237:232-241. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.12.010>.
15. Sun X., Wu W., Cao C., Xu L., Jiang R., Fang L., Sheng Z., Lu X. Research on vibration response characteristics and separation deformation law of fruit-branch system. *AIP Advances*. 2023; 13(6):065306. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0153355>.
16. Ma R., Homayouni T., Toudeshki A., Ehsani R., Zhang X. An Experimental Study and Mathematical Modeling of Vibration Transfer in Pistachio Trees Using an Inertia-Type Trunk Shaker and Field-Adapted Wireless Sensors. *Shock and Vibration*. 2022; 1:9966848. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/9966848>.
17. Bilir M., Karakaş M., Oktav A., Özdemir E., Savi A.S., Sevinç F., Türkan H.A. Experimental Verification of Dynamic Properties of a Hollow Aluminum Beam. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*. 2023; 5(3):149-162. – DOI: <https://doi.org/10.46740/alku.1324880>.
18. Барагунова Л.А., Шогенова М.М., Шогенов О.М., Жирикова И.А. Свободные и вынужденные колебания балок под действием распределенной нагрузки // *Вестник НИЦ «Строительство»*. – 2024. – Т. 41. – № 2. – С. 7-17. – DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-7-17).

19. Toleu Z., Liu J. Dynamic Cutting Properties of Miscanthus (giganteus) Stems Using an Impact Tester. *AgriEngineering*. 2024; 6(3):1987-2000. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030116>.
20. Kumar M., Sahoo P.K., Kushwaha D.K., Mani I., Pradhan N.C., Patel A., Tariq A., Ullah S., Soufan W. Force and power requirement for development of cumin harvester: a dynamic approach. *Sci Rep*. 2024; 14:13666. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64473-y>.
21. Nowakowski T., Tucki K. Impact of Blade Geometric Parameters on the Specific Cutting Energy of Willow (*Salix viminalis*) Stems. *Applied Sciences*. 2025; 15(2):696. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020696>.
22. Бухтояров Л.Д., Гнусов М.А., Лысыч М.Н. Математическая модель и методика экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния рамы машины для ухода за лесными культурами // *Лесотехнический журнал*. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 201-216. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/13>.
23. Фомина О.А., Фокин С.В. Совершенствование конструкции технических средств для производства топливной щепы из отходов лесозаготовок: монография. – Тюмень: ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2023. – 119 с. – ISBN 978-5-98346-152-9.
24. Сиваков В.В., Заикин А.Н. Совершенствование работы лесозаготовительных машин в условиях внедрения цифровых технологий // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2025. – № 255. – С. 320-335. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.255.320-335>.
25. Абдразаков Ф.К., Кузнецов В.А. Полевые исследования по зарастанию древесно-кустарниковой растительностью оросительных каналов Саратовской области // *Мелиорация и гидротехника*. – 2025. – Т. 15. – № 4. – С. 177-193. – DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-177-193>.

References

1. Grande E., Giordano E., Clementi F. Evaluation of Dynamic Properties of Trees Subjected to Induced Vibrations. *Applied Sciences*. 2023; 13(12):7333. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127333>.
2. Chau W.Y., Cheng N.L., Yu-Hsing W., Chiu S.W., Tan T.J., Wu J., Leung M.L., Tan P.S., Ooi G.L. Understanding the Dynamic Properties of Trees Using the Motions Constructed from Multi-Beam Flash Light Detection and Ranging Measurements. *Journal of The Royal Society Interface*. 2022; 19(193). – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2022.0319>.
3. Jiang X., Jiang F. Operational modal analysis using symbolic regression for a nonlinear vibration system. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2020; 40(1):120-134. – DOI: <https://doi.org/10.1177/1461348420905172>.
4. Drapalyuk M.V., Bukhtoyarov L.D., Kunitskaya O.A., Prokudina A.V., Grigorieva O.I., Otmakhov D.V. Izuchenie moshchnostnykh pokazateley i kachestva sreza sharnirno-sochlenennym i nozhevym rabochimi organami rotornogo kustoreza. [Study of power indicators and quality of cutting by articulated and knife working bodies of a rotary brush cutter]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2023; 2(58):7-13. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-2-7-13>.
5. Pang S., Jung J.S., Lee G.G., Shin J.H., Son J.W. Finite element analysis of structural safety and support reinforcement efficacy in a large old Zelkova tree: A case study of a natural monument. *BioResources*. 2025; 20(4):8632-8653. – DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.20.4.8632-8653>.
6. Zhuang Y., Xing A., Bartelt P., Bilal M., Ding Z. Dynamic response and breakage of trees subject to a landslide-induced air blast. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2023; 23(4):1257-1266. – DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1257-2023>.
7. Moravčík L., Vincúr R., Rózová Z. Analysis of the Static Behavior of a Single Tree on a Finite Element Model. *Plants*. 2021; 10(7):1284. – DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10071284>.
8. Karlinasari L., Bahtiar E.T., Kadir A.S.A., Adzkie U., Nugroho N., Siregar I.Z. Structural Analysis of Self-Weight Loading Standing Trees to Determine Its Critical Buckling Height. *Sustainability*. 2023; 15(7):6075. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su15076075>.
9. Aiso H., Nezu I., Hidayati F., Irawati D., Wahyudi I., Ohkubo T., Ishiguri F. Growth characteristics, stress-wave velocity of stems, and radial variations of wood properties and anatomical characteristics in six-year-old *Rubroshorea leprosula* and *R. macrophylla* planted in Central Kalimantan, Indonesia. *J Wood Sci*. 2025; 71(7):1611-4663. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-025-02181-5>.
10. Lin H., Sun L. Vibration responses characteristics of a Ginkgo biloba tree excited under harmonic excitation. *PLOS ONE*. 2021; 16:e0256492. – DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256492>.
11. Zijie N., Zhang X., Juntao D., Jun Z., Shijia P., Haotian M. Optimal vibration parameters for olive harvesting from finite element analysis and vibration tests. *Biosystems Engineering*. 2022; 215:228-238. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.002>.
12. Yu C., Qiao Y., Feng J., Guo T., Luo W., Guo J., Hu Y. Optimization of Vibration Parameters for Red Jujube Trees with Different Diameters. *Forests*. 2023; 14(7):1287. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071287>.

13. Zhang P., Yan D., Cai X., Chen Y., Luo L., Pan Y., Zou X. Multidirectional Dynamic Response and Swing Shedding of Grapes: An Experimental and Simulation Investigation under Vibration Excitation. *Agronomy*. 2023; 13(3):869. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030869>.
14. Wang R., Fang D., Wu C., Wang B., Zhu H., Hu T., Wu D. Dynamic response of *Camellia oleifera* fruit-branch based on mathematical model and high-speed photography. *Biosystems Engineering*. 2024; 237:232-241. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.12.010>.
15. Sun X., Wu W., Cao C., Xu L., Jiang R., Fang L., Sheng Z., Lu X. Research on vibration response characteristics and separation deformation law of fruit-branch system. *AIP Advances*. 2023; 13(6):065306. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0153355>.
16. Ma R., Homayouni T., Toudeshki A., Ehsani R., Zhang X. An Experimental Study and Mathematical Modeling of Vibration Transfer in Pistachio Trees Using an Inertia-Type Trunk Shaker and Field-Adapted Wireless Sensors. *Shock and Vibration*. 2022; 1:9966848. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/9966848>.
17. Bilir M., Karakaş M., Oktav A., Özdemir E., Savi A.S., Sevinç F., Türkan H.A. Experimental Verification of Dynamic Properties of a Hollow Aluminum Beam. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*. 2023; 5(3):149-162. – DOI: <https://doi.org/10.46740/alku.1324880>.
18. Baragunova L.A., Shogenova M.M., Shogenov O.M., Zhirikova I.A. Svobodnye i vyznuzhennyye kolebaniya balok pod deystviem raspredelennoy nagruzki. [Free and forced vibrations of beams under distributed loads]. *Vestnik NITS «Stroitelstvo» = Bulletin of the SRC "Construction"*. 2024; 41(2):7-17. (In Russ.). – DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-7-17).
19. Toleu Z., Liu J. Dynamic Cutting Properties of *Miscanthus (giganteus)* Stems Using an Impact Tester. *AgriEngineering*. 2024; 6(3):1987-2000. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030116>.
20. Kumar M., Sahoo P.K., Kushwaha D.K., Mani I., Pradhan N.C., Patel A., Tariq A., Ullah S., Soufan W. Force and power requirement for development of cumin harvester: a dynamic approach. *Sci Rep*. 2024; 14:13666. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64473-y>.
21. Nowakowski T., Tucki K. Impact of Blade Geometric Parameters on the Specific Cutting Energy of Willow (*Salix viminalis*) Stems. *Applied Sciences*. 2025; 15(2):696. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020696>.
22. Bukhtoyarov L.D., Gnusov M.A., Lysych M.N. Matematicheskaya model i metodika ekspress-otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ramy mashiny dlya ukhoda za lesnymi kulturami. [Mathematical model and methodology of express assessment of the stress-strain state of the machine frame for forest crops maintenance]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2025; 15(3(59)):201-216. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/13>.
23. Fomina O.A., Fokin S.V. Sovershenstvovanie konstruktivnykh sredstv dlya proizvodstva toplivnoy shchepy iz otkhodov lesozagotovok: monografiya. [Improving the design of technical means for the production of fuel chips from logging waste]. Tyumen: FSBEI HE Northern Trans-Ural, 2023. 119 p. (In Russ.). – ISBN 978-5-98346-152-9.
24. Sivakov V.V., Zaikin A.N. Sovershenstvovanie raboty lesozagotovitelnykh mashin v usloviyakh vnedreniya tsifrovoykh tekhnologiy. [Improving the performance of forestry machines in the context of digital technologies]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2025; 255:320-335. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.255.320-335>.
25. Abdrazakov F.K., Kuznetsov V.A. Polevye issledovaniya po zarastaniyu drevesno-kustarnikovoy rastitelnostyu orositelnykh kanalov Saratovskoy oblasti. [Field research on overgrowth of trees and shrubs in irrigation canals of the Saratov region]. *Melioratsiya i gidrotekhnika = Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025; 15(4):177-193. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-177-193>.

Сведения об авторах

✉ *Бухтояров Леонид Дмитриевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vgltla-mlx@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Leonid D. Bukhtoyarov* – candidate of technical sciences, associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, 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: vgltla-mlx@yandex.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author



Оценка эксплуатационной эффективности харвестеров с применением энергетической концепции

Сергей А. Голякевич ✉, gsa@belstu.by, 0000-0001-5095-8725

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова 13 а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

В статье изложены результаты комплексных исследований по оценке эксплуатационной эффективности харвестеров. Аналитической основой исследований является предложенная автором энергетическая концепция создания и применения комплексов многооперационных лесозаготовительных машин. Исходные данные для анализа представляют собой результаты экспериментальных исследований и математического моделирования работы харвестеров. Оценка адекватности и точности использованной авторской математической модели выполнена по t-критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05. Критерием оценки эффективности выступает разработанный интегральный показатель удельного потенциала производительности. Исследования проведены для типовых лесозаготовительных условий Республики Беларусь и технологических процессов разработки лесосек комплексами многооперационных лесозаготовительных машин. Изложены результаты оценки скорости работы приводов отдельных звеньев манипуляторов и его влияние на эффективность технологического процесса харвестера. Показано, что вклад скорости работы отдельных звеньев существенно зависит от характера совмещаемых оператором движений. Установлено, что рост подачи гидравлической жидкости в гидроцилиндр телескопического звена свыше 117 л/мин практически не приводит к росту средних скоростей выполнения операции перемещения дерева, а лишь увеличивает динамическую нагруженность и энергозатраты на преодоление сил инерции. По результатам исследований установлены закономерности нелинейного изменения затрат энергии, времени и динамических нагрузок в конструкциях харвестеров при различных вариантах совмещения операций валки деревьев их перемещения и обрезки сучьев при соответствующих мощностях приводов в стохастически распределенных лесозаготовительных условиях. Предложен технологический процесс последовательного применения на одной лесосеке харвестеров разных размерно-энергетических классов, который на 14,4–16,9% эффективнее в сравнении с технологией отдельного применения харвестера большего размерно-энергетического класса для условий лесосек, имеющих значительную стохастичность объёмов стволов.

Ключевые слова: харвестер, операция, методика, эффективность, технология, эксплуатация, условия, манипулятор, харвестерная головка, концентрация, валка, обрезка сучьев, раскряжевка

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: Автор благодарит сотрудников кафедры лесных машин, дорог и технологий лесозаготовительного производства Белорусского государственного технологического университета и Научно-технического центра холдинга «Амкодор» за техническую помощь и важные практические замечания в процессе проведения исследований, а также рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Голякевич, С. А. Оценка эксплуатационной эффективности харвестеров с применением энергетической концепции / С. А. Голякевич // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 183–203. – Библиогр.: с. 200–203 (30 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/12>.

Поступила 20.02.2026. Пересмотрена 20.03.2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

Evaluating the operational efficiency of harvesters using an energy-based approach

Sergey A. Golyakevich ✉, gsa@belstu.by,  0000-0001-5095-8725

Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13 a, Minsk, 220006, Republic of Belarus

Abstract

The article presents the results of comprehensive research evaluating the operational efficiency of harvesters. The analytical basis of the research is the author's proposed energy concept for the development and application of multi-operation timber-harvesting machine complexes. The initial data for the analysis comprise the results of experimental studies and mathematical modeling of harvester operation. The assessment of the adequacy and accuracy of the author's mathematical model used was performed using the Student's t-test at an innovation level of 0.05. The evaluation criterion is a developed integral indicator of specific productivity potential. The research was conducted for typical logging conditions in the Republic of Belarus and technological processes for timber harvesting using complexes of multi-operation forestry machines. Based on the research results, regularities of nonlinear changes in energy consumption, time, and dynamic loads in harvester structures were established. These changes occur under various modes of combining tree felling, moving, and delimbing operations with corresponding drive powers in stochastically distributed logging conditions. The results of assessing the speed of the drives of individual manipulator links and its impact on the efficiency of the harvester's technological process are presented. It is shown that the contribution of the operating speed of individual links significantly depends on the nature of the movements combined by the operator. It has been established that increasing the hydraulic fluid flow rate to the telescopic link cylinder above 117 L/min practically does not lead to an increase in the average speeds of the tree moving operation, but only increases dynamic loading and energy consumption for overcoming inertia forces. A technological process involving the sequential application of harvesters of different size-energy classes on the same cutting area is proposed. This process is 14.4–16.9% more efficient compared to the technology of using only a larger size-energy class harvester in conditions where cutting areas have significant stochastic variability in trunk volumes.

Keywords: *harvester, forwarder, operation, methodology, efficiency, technology, operation, conditions, manipulator, harvester head, concentration, felling, delimbing, bucking*

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The author thanks the staff of the Department of Forest Machines, Roads and Logging Technologies of the Belarusian State Technological University and the Scientific and Technical Center of the Amkodor Holding for their technical assistance and important practical comments during the research process, as well as the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: Golyakevich S. A. (2026). Evaluating the operational efficiency of harvesters using an energy-based approach. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 183-203 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/12>.

Received 20.02.2026.

Revised 20.03.2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Конкурентоспособность многооперационных лесозаготовительных машин (МЛМ) во многом определяется совокупностью эксплуатационных потребительских качеств: производительности Т.В. Сергеева (2024) [1], J. Routa (2020) [2], G.Szewczyk, (2020) [3], S. A. Borz (2021) [4], П. В. Будник (2021) [5], P. Budnik (2020) [6], Е. Е. Клубничкин (2025) [7]; Ф. В. Свойкин и др. (2021) [8], экономичности Н. Soman (2020) [9]; A. Simon (2022) [10]; А.П. Соколов и др. (2023) [11], К. П. Рукомойников и др. (2020) [12], К. П. Рукомойников и др. (2020) [13], эксплуатационной надежности А. П. Мохирев (2022) [14], которые характеризуют их соответствие целевым лесозаготовительным условиям и технологиям применения. Существующие научные теории направлены на обоснование параметров лесозаготовительных машин, формирование из них лесозаготовительных комплексов, построение новых и адаптацию существующих технологических процессов. В них обособленно исследуются вопросы динамики и прочности конструкций машин, производительности и энергоёмкости К. Polowy (2023) [15]; С. Б. Якимович (2020) [16]; Т.И. Савиных (2021) [17], реализации эксплуатационных свойств харвестерных головок В. Hutton (2021) [18], V. Mergl (2021) [19], проходимости J. B. Heppelmann (2022) [20], [21], А.А. Егорин (2023) [22], Е. Е. Клубничкин (2023) [23], устойчивости С. П. Карпачев (2021) [24], тяговых С. А. Коростелев (2022) [25], А.В. Лавров (2022) [26] и других эксплуатационных свойств. При этом вопросы взаимосвязи МЛМ, работающих в едином комплексе, и системный анализ взаимного влияния их технических характеристик на совокупность эксплуатационных потребительских качеств в рамках существующих теорий рассмотрены мало F. Holzleitner (2022) [27], Ю.А. Ширнин (2021) [28] В. И. Прядкин (2018) [29]. Во многом это обуславливает ограниченность практического эффекта их использования.

Предлагаемая энергетическая концепция создания и применения комплексов МЛМ основывается на совместной оценке энергопотребления, длительности реализуемых технологических процессов и силового нагружения конструкций МЛМ. Концепция предполагает использование в качестве оценочного критерия эффективности – интегральной величины удельного энергетического потенциала производительности комплекса машин $УЭПП_K$ ($м^6/МДж \cdot с$), отдельно харвестера $УЭПП_Х$, или для отдельных операций – частного удельного энергетического потенциала производительности соответствующей операции ($ЧЭПП_{Оп}$). Она оценивает удельные энергетические затраты, приходящиеся на единицу долговременной производительности (с учетом эксплуатационной надежности). Это позволяет научно-обосновано выбирать параметры машин и технологии при которых достигается требуемый уровень

производительности, но при этом отсутствует несоразмерный рост энергопотребления комплекса МЛМ или снижение его эксплуатационной надежности. При необходимости достижения иных показателей, к примеру наибольшей величины производительности ($м^3/ч$), минимального энергопотребления ($МДж/м^3$), либо наибольшей эксплуатационной надежности (большой коэффициент технической готовности) – данные единичные показатели также могут быть использованы в качестве критериев оптимизации. При этом другие элементы концепции (математическая модель «эксплуатационные условия – технология – комплекс МЛМ», экспериментальные и теоретические данные и подходы к их анализу С. А. Голякевич (2024) [30] и др.) могут быть использованы и для них.

Цель работы – апробация энергетической концепции создания и применения комплексов МЛМ при учете стохастичности условий эксплуатации на примере анализа эффективности работы харвестеров.

В соответствии с целью работы поставлены и решены следующие **задачи**:

- установление закономерностей взаимосвязного изменения затрат времени, энергии и динамической нагруженности харвестеров на отдельных операциях технологических циклов;
- комплексная техническая оценка влияния параметров и технологий работы харвестеров на их эксплуатационные показатели;
- экспериментальное и теоретическое обоснование технологического процесса последовательного применения на одной лесосеке харвестеров разных размерно-энергетических классов.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований.

Объектами исследования являлись харвестеры производства Республики Беларусь, а также технологии их применения. В качестве базовых массовых, геометрических и кинематических характеристик для последующего анализа приняты, параметры харвестера Амкодор 2551, как получившего наибольшее распространение в Республике Беларусь на рубках главного пользования, а также Vimek 404 T6 и Belarus-Sampo MLX 046 для рубок ухода.

Условиями эксплуатации харвестеров (если отдельно не указано иное) являлись сплошнолесосечные рубки главного пользования в чистом сосновом древостое I класса бонитета на лесосеке площадью 5 га, размерами 200х250 м, которая располагалась на грунтах I категории. В зависимости от этапа исследования харвестер выполнял отдельные и совмещенные операции, а также разрабатывал лесосеку с одновременным прорубанием прямолинейных технологических коридоров и, если не указано иное, производил укладку лесоматериалов в 4

группы сортировки с двух сторон от него. Параллельно харвестер формировал 2 вала порубочных остатков вдоль технологического коридора.

Предметом исследования являлись взаимосвязано изменяющиеся величины затрат времени, энергии и динамической нагруженности харвестеров, а также эффективность способов, приемов и режимов выполнения ими технологических операций.

Сбор данных для проведения анализа проводился с использованием комплексной авторской математической модели «эксплуатационные условия–технология–комплекс МЛМ», а также экспериментальных исследований, проведенных с использованием обозначенных в объекте исследования харвестеров и форвардеров в условиях филиала Белорусского государственного технологического университета «Негорельский учебно-опытный лесхоз» и ГЛХУ «Пуховичский лесхоз».

Комплексная математическая модель реализована следующим образом. Модель конструкции харвестера с учетом динамики и математическое описание технологии его работы реализованы в программном пакете Matlab 2022b путем непосредственной записи систем дифференциальных и отдельных алгебраических уравнений. Связанные с ними модели гидравлического привода и систем управления, реализованы в Matlab 2022b/Simulink/Simscape. При обработке и анализе данных о энергетических затратах, времени и динамической нагруженности конструкций и систем, полученных из математической модели, использованы программные пакеты MatLab 2022b, MathCad 15, Origin 7.5, а при получении и обработке экспериментальных данных – HBM Catman 4.5, HBM Catman AP, Parker Sensocontrol SensoWin 7.1.9.8.

По результатам сбора получены первичные данные первичные данные о продолжительности выполнения операций харвестерами на операциях

валки деревьев, обрезки сучьев, раскряжевки подсортировки и перемещения для различных вариантов технологических процессов работы. Варьируемыми параметрами являлись: размерно-энергетические характеристики харвестеров, в том числе энергетические параметры их гидросистем, способы, приемы и режимы выполнения операций.

Анализ данных. Данные, полученные экспериментально, подтвердили адекватность и точность разработанной математической модели (таблица 1).

Заметим, что операции работы манипулятора и харвестерной головки характеризуются не стационарностью протекающих процессов (быстротечные на переходных режимах). В таких процессах нельзя использовать наиболее информативные критерии оценки эквивалентности спектральных плотностей. Поэтому точность реализации математической модели подтверждена с помощью оценки расхождения теоретически и экспериментально полученных значений затрат времени и энергии ($E_{\text{теор}}$ и $T_{\text{теор}}$) на выполнение соответствующих операций по критерию по t -критерию Стьюдента. В качестве примера (таблица 1) приведены математические ожидания $M[H]$, дисперсии $D[H]$ и среднеквадратические отклонения σ_H , экспериментально полученных данных, а также теоретические значения $E_{\text{теор}}$ (Дж) и $T_{\text{теор}}$ (с). Полученные величины t - критерия Стьюдента составили от 0,79 до 2,09 для величин затрат энергии и от 1,69 до 2,07 для величин затрат времени, что для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и количестве повторений каждого экспериментального исследования равного 4 ниже процентной точкой распределения Стьюдента $t_{\alpha} = 2,132$. Таким образом принята гипотеза о соответствии данных моделирования полученным экспериментальным данным.

Таблица 1

Сравнение данных о энергетических и временных затратах на отдельных операциях работы харвестеров полученных путем моделирования и экспериментально

Table 1

Comparison of data on energy and time costs for individual harvester operations obtained through modeling and experimentally

Операция Operation	Положения и ход гидроцилиндров Positions and stroke of the hydraulic cylinders			Оценка затраченной энергии Estimation of energy expended					Оценка продолжительности Duration estimation				
	стре-ла Boom	руко-ять Stick	телес-коп Telesc. sect.	$E_{теор},$ кДж $E_{теор},$ kJ	$\Delta, \%$	$M[H],$ кДж $M[H],$ kJ	$D[H],$ кДж ² $D[H],$ kJ ²	$\sigma_H,$ кДж $\sigma_H,$ kJ	$T_{теор},$ с $T_{теор},$ s	$\Delta, \%$	$M[H],$ с $M[H],$ s	$D[H],$ с ² $D[H],$ s ²	$\sigma_H,$ с $\sigma_H,$ s
Перемещение деревьев сокращением гидроцилиндра рукоятки манипулятора харвестера Moving trees by retracting the hydraulic cylinder of the harvester's manipulator													
объем ствола 0,6–0,7 м ³ trunk volume 0,6–0,7 м ³	0,03	0–0,54	0	43,88	-6,18	46,77	12,59	3,55	4,12	-2,6	4,23	0,0169	0,13
объем ствола 0,2–0,3 м ³ trunk volume 0,2–0,3 м ³	0,03	0–0,54	0	34,43	-3,5	35,68	9,93	3,15	3,26	-6,59	3,49	0,0576	0,24
Обрезка сучьев харвестерной головкой Delimbing with the harvester head													
объем ствола 0,6–0,7 м ³ trunk volume 0,6–0,7 м ³	не определялись were not determined			455,2	-7,53	492,3	1259,5	35,49	8,53	6,57	9,13	0,3364	0,58
объем ствола 0,2–0,3 м ³ trunk volume 0,2–0,3 м ³	не определялись were not determined			314,7	-5,46	332,9	337,46	18,37	3,61	-7,9	3,92	0,1024	0,32

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations.

Результаты

Технологические возможности харвестера, количественное соотношение между длительностью стационарных операций и операций передвижения во многом определяются характеристиками рабочего вылета его манипулятора. Собственные исследования, а также исследования других ученых показывают, что рабочий вылет часто меньше проектного кинематического. Он ограничен грузоподъемностью манипулятора, его тяговыми свойствами, устойчивостью харвестера при заданном относительном положении манипулятора и опорного контура харвестера, возможностью точного наведения головки.

При обработке дерева с объемом ствола до 0,25 м³ (рисунок 1, зона I) манипулятор (вылет 9,5 м и грузовой момент брутто 153 кН·м) обладает достаточной грузоподъемностью для его сталкивания с пня, удержания и валки. Для перемещения деревьев с большими объемами стволов по траекториям, показанным на рисунке 1 б, поз. 4, необходимо предварительно обеспечить устойчивость харвестера, путем увеличения ширины либо массы его шасси (к примеру, за счет использования съемных металлических гусениц или наполнения колес водно-солевым раствором).

При объеме ствола до 0,66 м³ (рисунок 1, зона II) грузоподъемность манипулятора достаточна для волочения дерева, но не достаточна для его

удержания на максимальном вылете без опоры кроны на землю. В зоне III (объемы стволов 0,66 м³ – 1,22 м³) волочение возможно, но только без значительного отрыва комлевой части от поверхности. При этом экспериментально установлено, что максимальный рабочий вылет манипулятора харвестера на рубках главного пользования в типичном сосновом древостое с вероятностью 0,98 не превышает 8,7 м.

Продолжительность подтаскивания дерева к месту раскряжевки зависит не только от энергетических параметров привода и объема ствола перемещаемого дерева, но и от выбранного способа перемещения. На практике реализуются следующие основные варианты последовательных и параллельных действий оператора. В первом случае (рисунок 1 б поз.1) он сталкивает дерево с пня и дожидается его полного приземления, затем последовательно втягивает телескопическое звено, сокращает вылет манипулятора стрелой и рукоятью и лишь после этого поворачивает манипулятор на заданный угол. Эффективность выполнения операции таким способом показана на рисунке 1 а поз. 1. Использование такого варианта ограничено максимальным объемом ствола 0,84 м³. Также при положении манипулятора под углом более 78° к продольной оси харвестера возникает нарушение его устойчивости по условию опрокидывания.

Значительно повысить эффективность переместительных операций позволяют способы с частичным (рисунок 1 а, поз. 2 и 3) и полным (рисунок 1 а, поз. 4) совмещением движений звеньев манипулятора. Траектории движения точки подвеса харвестерной головки для вариантов 2 и 3 различны и показаны на рисунке 1 б поз. 2 и поз. 3 соответственно. В этих вариантах оператор вытягивает

телескопическое звено непосредственно во время падения дерева, а по его окончании либо одновременно начинает сокращать вылет манипулятора и поворачивать его на заданный угол (рисунке 1 б, поз. 3), либо делает это последовательно (рисунке 1 б, поз. 2). В варианте № 4 (рисунке 1 б, поз. 4) все действия совершаются параллельно.

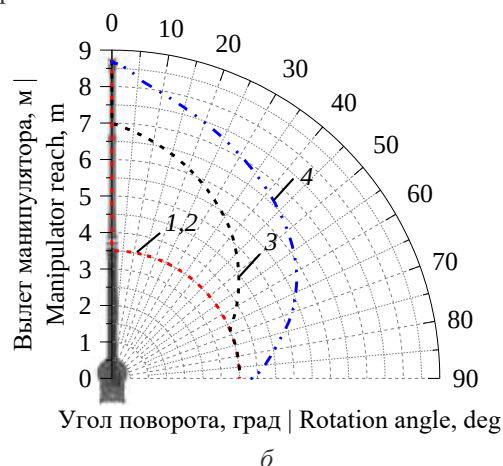
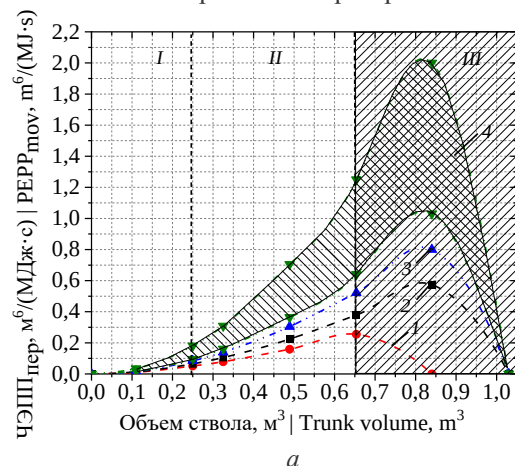


Рисунок 1. Эффективность операции перемещения дерева к месту раскряжевки (а) по различным траекториям движения (б) в зависимости от используемых приемов работы манипулятора:

1 – при последовательном падении дерева, вытягивании телескопического звена, сокращении вылета манипулятора, его повороте; 2 – при падении дерева с одновременным вытягиванием телескопического звена, а затем последовательном сокращении вылета манипулятора и его повороте; 3 – при падении дерева с одновременным вытягиванием телескопического звена, и последующем совместном сокращении вылета манипулятора и его повороте; 4 – все приемы выполняются параллельно

Figure 1. Efficiency of the tree moving operation to the bucking site (a) along different movement trajectories (b) depending on the manipulator work techniques used: 1 – sequential tree falling, retraction of the telescopic section, reduction of the manipulator reach, and its rotation; 2 – tree falling with simultaneous retraction of the telescopic section, followed by sequential reduction of the manipulator reach and its rotation; 3 – tree falling with simultaneous retraction of the telescopic section, followed by combined reduction of the manipulator reach and its rotation; 4 – all techniques performed in parallel

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Эффективность подобных совмещений при объеме перемещаемых стволов до $0,66 \text{ м}^3$ выше в 1,2 – 1,41 раза (вариант 2), в 1,54–2,05 раза (вариант 3) и в 3,22–4,9 раза (вариант 4, рисунке 1 б поз. 4 верхняя граница) в сравнении с вариантом 1. Это достигается за счет сокращения времени выполнения операции, при незначительном изменении энергозатрат. В первом варианте совокупная продолжительность валки дерева и его перемещения в заданную точку составляет 12,1–15,2 с при энергетических затратах 93,2–110,5 кДж. Для реализации варианта №2 требуется от 10,1 с до 10,9 с при энергозатратах 93,0–112,8 кДж. В варианте №3 – 6,9–7,5 с и 104,6–117,3 кДж соответственно. Для варианта с параллельным выполнением всех действий – около 3,4–3,6 с и 98,1–100,7 кДж.

Важно отметить следующую особенность варианта выполнения операции № 4. При его

использовании одновременно задействовано 3 гидравлических потребителя, имеющих разное рабочее давление. Исследования позволили выявить существенные потери энергии при реализации такого варианта совмещения в гидросистемах с общим гидравлическим насосом и управлением по давлению нагрузки. Во время выполнения операции по варианту № 4 КПД привода с таким управлением находится в широком диапазоне 0,3 – 0,86. Усредненно за всю операцию, вне зависимости от объема обрабатываемого дерева он составляет 0,51 – 0,54. Это существенно снижает энергетическую эффективность работы, что отмечено на рисунке 1 отдельной зоной. При аналогичном времени выполнения операции затраты энергии возрастают с отмеченных ранее 98,1 – 100,7 кДж на стороне исполнительных гидроцилиндров и гидромотора, до 188,2 – 191,7 кДж на гидравлическом насосе.

Описанные варианты совмещения приемов выполнения операций помимо квалификации оператора требуют соответствующих энергетических характеристик харвестера и гидравлического привода звеньев манипулятора. Изложенные выше показатели эффективности (при объеме ствола $0,66 \text{ м}^3$) достигаются при задействованных мощностях приводов гидроцилиндров телескопического звена $15,25 \text{ кВт}$ и рукояти $16,86 \text{ кВт}$. Задействованная мощность привода механизма поворота отличается в зависимости от используемого способа выполнения операции и находится в диапазоне – $7,5 - 28,5 \text{ кВт}$. Для реализации рассмотренных режимов (с учетом неравномерности загрузки приводов) общее потребление гидравлической жидкости манипулятором составляет от 94 л/мин (при варианте выполнения операций №1) и до 172 л/мин (при варианте №3). Применение варианта № 4 требует до 237 л/мин . Привод от одного гидравлического насоса и оборудовании его системой управления по нагрузке, подводимая к нему мощность изменяется от $39,2 \text{ кВт}$ до $71,6 \text{ кВт}$ для вариантов №1 – №3 и до $98,75 \text{ кВт}$ для варианта № 4 соответственно.

Изменение энергетических характеристик приводов телескопического звена, рукояти и механизма поворота по-разному влияют на эффективность переместительных операций. В качестве базовых расходов гидравлической жидкости выбраны: для гидроцилиндра телескопического звена – 65 л/мин , рукояти – 92 л/мин , для гидромотора механизма поворота – 81 л/мин (рисунок 2).

Заметно, что наибольший вклад в прирост эффективности при варианте выполнения операции №3 приносит увеличение гидравлического расхода на телескопическом звене. Сокращение времени втягивания телескопического звена напрямую влияет на продолжительность всей операции, которая снижается с $7,3 \text{ с}$ до $5,5 \text{ с}$. Важно, что при расходе свыше 117 л/мин не происходит значимого прироста эффективности. Это связано с возрастанием энергозатрат на преодоление сил инерции и малым приростом средней скорости втягивания.

Характерная особенность наблюдается при изменении гидравлического расхода в механизме поворота. При значениях выше 73 л/мин продолжительность поворота манипулятора становится меньше времени сокращения вылета гидроцилиндром рукояти, т.е. действия оканчиваются не синхронно, а приращение расхода не влияет на общую его продолжительность. При

этом совокупный расход энергии на операции возрастает от $108,6 \text{ кДж}$ (из которых $61,5 \text{ кДж}$ на сокращение вылета и поворот) при гидравлическом расходе гидромотора 73 л/мин до $121,4 \text{ кДж}$ ($74,3 \text{ кДж}$ на сокращение вылета и поворот) – при 104 л/мин . Характерное качественное изменение процесса заметно на рисунке 2 поз. 3 при расходе 81 л/мин , где поворот манипулятора заканчивается раньше сокращения вылета манипулятора рукоятью.

Эффективность рассматриваемой переместительной операции зависит не только от параметров привода, но и от массовых характеристик манипулятора и харвестерной головки. В качестве примера на рисунке 2 б рассмотрено изменение эффективности операции при снижении массы харвестерной головки (поз. 2) и манипулятора (поз. 1) при сохранении положения их центров тяжести. За базовые массовые характеристики для оценки относительного изменения эффективности приняты параметры манипулятора Kesla 1395H (масса 1900 кг) с харвестерной головкой Kesla 25RH (масса 860 кг). Относительный прирост эффективности приведен в рамках рассматриваемой операции. Совокупный прирост эффективности работы харвестера и комплекса зависит от общей структуры технологического цикла и доли времени данной операции в общей его продолжительности.

В момент контакта дерева с опорной поверхностью на подвес харвестерной головки действует ударная нагрузка со стороны комля дерева (рисунок 3, зона I). Заметно, что ударное воздействие не линейно возрастает с увеличением объема ствола дерева от $14,25 \text{ кН}$ при объеме ствола $0,11 \text{ м}^3$ до $45,57 \text{ кН}$ при объеме ствола $1,0 \text{ м}^3$. Коэффициент динамичности находится ($k_{дл.1}$) в диапазоне $1,51 - 2,57$ относительно статического удержания дерева в вертикальном положении, а относительно величины его натяга с избытком запаса усилия по массе ствола $1,25$ ($k_{дл.1,25}$) в диапазоне $1,47 - 2,28$. Это означает возможность отрыва дерева от пня с сохранением минимальной устойчивости харвестера по условию опрокидывания не гарантирует ее сохранения в момент приземления дерева. Поэтому приемы работы с сокращением вылета в процессе падения дерева являются не только способом повышения эксплуатационной эффективности, но и важной составляющей безопасной работы харвестеров. Для исключения ударных нагрузок на подвес харвестерной головки может использоваться прием с отпусканием дерева после сообщения ему требуемого направления валки.

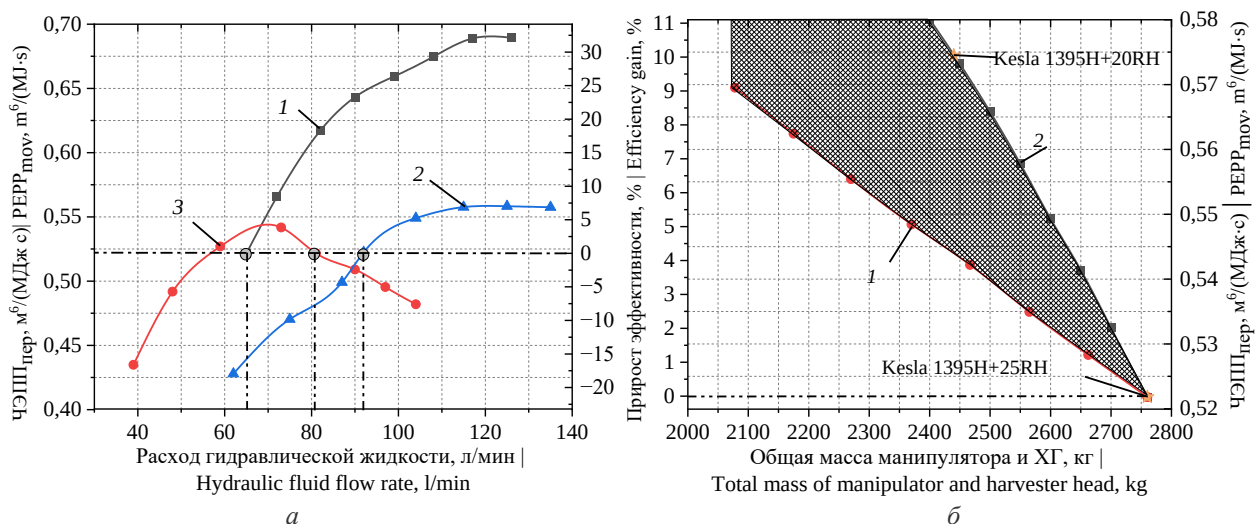


Рисунок 2. Эффективность перемещения дерева сосны (с объемом ствола 0,66 м³) манипулятором от места валки (вылет манипулятора 8,7 м) к месту раскряжевки (вылет манипулятора 3,5 м)
 а – в зависимости от ограничения максимального расхода гидравлической жидкости гидроцилиндрами телескопического звена (1), рукояти (2) и гидромотором механизма поворота (3); б – при изменении общей массы манипулятора и харвестерной головки за счет массы манипулятора (1) и харвестерной головки (2)
 Figure 2. Efficiency of moving a pine tree (with a stem volume of 0.66 m³) by the manipulator from the felling site (manipulator reach 8.7 m) to the bucking site (manipulator reach 3.5 m): а – depending on the limitation of the maximum hydraulic fluid flow rate by the hydraulic cylinders of the telescopic section (1), the stick (2), and the hydraulic motor of the rotation mechanism (3); б – when varying the total mass of the manipulator and harvester head due to the mass of the manipulator (1) and the harvester head (2).

Источник: собственная композиция автора
 Source: author's composition

Продолжительность валки деревьев с отмеченными объемами стволов составляет от 2 с до 3,8 с, с увеличением размеров их крон может возрастать до 6 с и более при зависании на кронах стоящих деревьев. Энергия на привод технологического оборудования при отсутствии движения манипулятора не потребляется. Однако падающее дерево само является источником кинетической энергии, которая имеет существенный потенциал параллельного использования или накопления (рекуперации). Примером параллельного использования энергии может служить перемещение дерева манипулятором к месту раскряжевки. Рекуперация возможна за счет использования

гидроцилиндров или гидронасосов с накоплением гидравлической энергии вытесняемой ими жидкости в гидравлических аккумуляторах или после преобразования в электрическую энергию в суперконденсаторах. Область применения рекуперированной энергии в приводах харвестеров достаточно широка. Среди наиболее перспективных – компенсация запаздывания процесса регулирования гидронасосов во время начала работы нескольких объемных гидравлических потребителей; привод малообъемных потребителей (гидроцилиндры пильных механизмов, реечные поворотные устройства манипуляторов и т. д.).

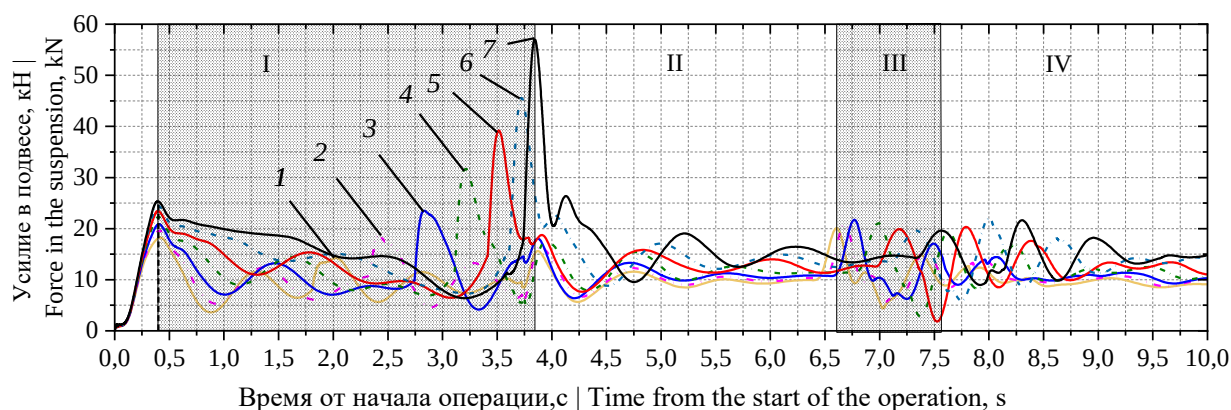


Рисунок 3. Силовое нагружение подвесной скобы харвестерной головки в процессе валки и перемещения деревьев объемом: 1 – 0,11 м³; 2 – 0,21 м³; 3 – 0,33 м³; 4 – 0,49 м³; 5 – 0,66 м³; 6 – 0,84 м³; 7 – 1,0 м³
 Figure 3. Force loading on the suspension bracket of the harvester head during felling and movement trees of the following volumes: 1 – 0.11 м³; 2 – 0.21 м³; 3 – 0.33 м³; 4 – 0.49 м³; 5 – 0.66 м³; 6 – 0.84 м³; 7 – 1.0 м³

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Рациональным также следует считать использование кинетической энергии падения дерева для одновременного сокращения вылета манипулятора. Для рассматриваемого базового варианта манипулятора такой подход позволяет уменьшить время проведения совокупности операций «валка+перемещение дерева» на 1,5–3,4 с при объемах ствола 0,035–0,66 м³, при не значительном росте энергозатрат до 24,2 кДж. Прирост ЧЭПП_{ВП} относительно раздельного выполнения этих операций составляет 0,01–0,1 м⁶/МДж·с (27,9–43,5%).

Руководствуясь высокими показателями прироста ЧЭПП_{ВП} следует однозначно рекомендовать данное совмещение операций к использованию операторами. Но, для больших объемов стволов следует дополнительно оценивать величину ударного воздействия на подвес харвестерной головки при контакте кроны дерева как показано на рисунке 3.

Операция обрезки сучьев харвестером характеризуется высоким удельным потреблением гидравлической энергии (рисунок 4 а) и быстротечностью (рисунок 4 б). Обращает на себя внимание значительная разница в эффективности

проведения операции при использовании одной и той же харвестерной головки с различным приводом подающего механизма. При равном диаметре подающих валцов (0,29 м) повышение рабочего объема гидромоторов привода с 470 см³ (Rexroth 470 cc) до 565 см³ (Poclain 565 cc) при прочих равных условиях влечет за собой смещение зоны эффективной работы в сторону больших диаметров обрабатываемых стволов (рисунок 4 а).

Так, более объемные гидромоторы привода эффективнее использовать, начиная с объемов ствола свыше 0,34 м³ (для сосны). Малообъемные – повышают показатели эффективности харвестера при работе с меньшими диаметрами обрабатываемых деревьев, что объясняется способностью быстрее достигать более высоких рабочих скоростей подачи (до 5–6 м/с).

В тонкомерном древостое, при малой длительности цикла подачи (до 3,5 с) это имеет решающее значение. Однако, ввиду более низкого тягового усилия такого подающего механизма (до 18 кН) при увеличении объема ствола обрабатываемого дерева свыше 0,6 м³ время цикла обработки возрастает более чем на 30% (рисунок 4 б) в сравнении с более объемным приводом, создающим тяговое усилие до 21 кН.

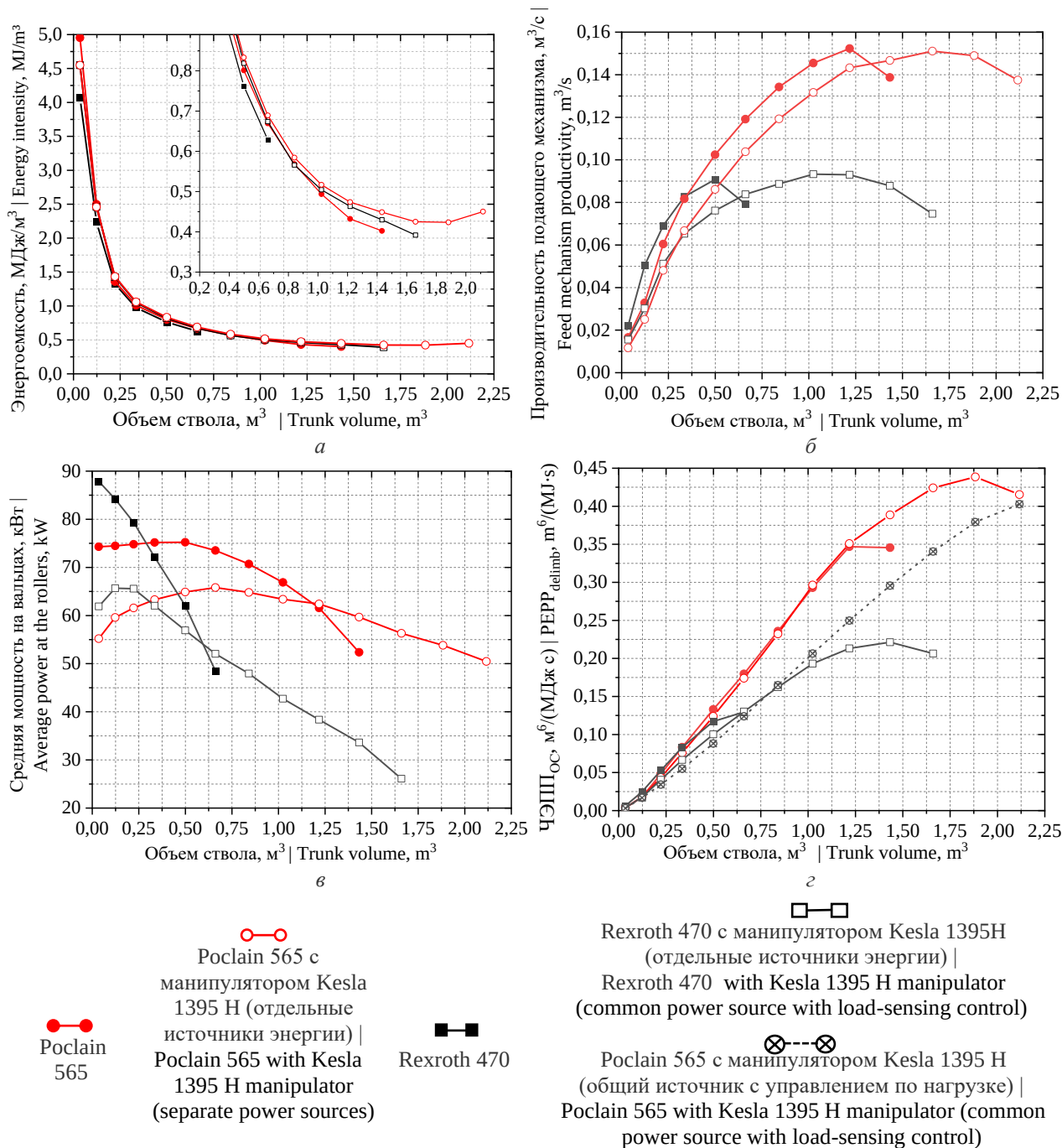


Рисунок 4. Показатели эффективности процесса обрезки сучьев харвестерной головкой, оборудованной различными гидромоторами подающих валцов, с использованием и без использования ее дополнительной подачи манипулятором:

а – энергоемкости; б – производительности; в – средней мощности, реализованной на подающем механизме; г – частного энергетического потенциала производительности (ЧЭПП_{ос})

Figure 4. Efficiency indicators of the delimbing process by a harvester head equipped with various hydraulic motors for the feed rollers, with and without the use of its additional feed by the manipulator: a – energy intensity; b – productivity; c – average power realized on the feed mechanism; d – partial energy potential of productivity (PEPP)

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

За счет совместной работы манипулятора и подающего механизма харвестерной головки можно существенно расширить рабочий диапазон

обрабатываемых деревьев. Для привода с рабочим объемом гидромоторов 470 см³ при дополнительной подаче манипулятором Kesla 1395 Н возможно

увеличение объема обрабатываемых стволов до 1,65 м³. Во втором случае (570 см³) до 2,1 м³, однако для рассматриваемого харвестера такие возможности избыточны. При рабочем вылете 9,5 м он позволяет без потери устойчивости обрабатывать деревья сосны объемом не более 0,25 м³ или при снижении рабочего вылета до 6,2 м – не более 1,22 м³. При этом сам манипулятор позволяет подтаскивать деревья с объемом ствола до 1,22 м³ (рисунок 1) с максимального вылета 9,5 м.

Это означает, что зона совместной работы манипулятора и подающего механизма харвестерной головки (с гидромоторами 570 см³) при сокращенном до 6,2 м вылете ограничена диапазонами объемов стволов сосны 0,87–1,22 м³, а для гидромоторов 470 см³ – 0,65–1,22 м³. Усилие дополнительной подачи харвестерной головки манипулятором ограничивается силой сопротивления волочению кроны дерева по поверхности и находится в диапазоне от 0,08 кН для ствола объемом 0,01 м³ до 3,39 кН для объема ствола 1,22 м³.

Большие дополнительные усилия манипулятора приводят к сонаправленному перемещению кроны и резкому снижению эффективности такого совмещения. Заметим также, что в исследованиях для подающего механизма с приводом 570 см³ прием совмещения работы манипулятора и харвестерной головки применялся только для первых лесоматериалов в стволе, а для подающего механизма 470 см³ начиная с объема ствола 1,22 м³ для первых двух лесоматериалов.

Рассмотренная возможность совместной работы манипулятора и подающего механизма харвестерной головки должна обязательно учитываться в практике проектирования харвестеров. Отсутствие учета приводит к завышению энергетических характеристик привода харвестерной головки, ее собственной массы и, как следствие, грузового момента и массы манипулятора. Данные изменения конструкции приводят к снижению устойчивости харвестера против опрокидывания, снижению рабочего вылета, либо росту массы и габаритных параметров его шасси. В качестве эффективного показателя работы привода при его проектной оценке следует принимать большую из величин ЧЭПП_{ос}, полученную для вариантов обработки дерева с совмещением и без него. К примеру, для привода с гидромоторами 565 см³ при объеме ствола 1 м³ следует принимать оценку, полученную с учетом совмещения, а при 0,75 м³ – без него (рисунок 4 з).

Данные рисунка 4 справедливы для раздельного привода манипулятора и подающего механизма харвестерной головки от отдельных источников гидравлической энергии. При использовании общего источника собственное энергопотребление привода возрастает. Конечная

величина прироста зависит от способов автоматизированного управления таким приводом. В качестве примера, на рисунке 4 з дополнительно приведен график ЧЭПП_{ос} для варианта с гидромоторами 565 см³ и автоматизированным управлением гидроприводом по нагрузке, регистрируемой на каждом активном потребителе. Подобная автоматизация управления часто применяется на современных лесозаготовительных машинах. Заметно, что разница в эффективности проведения операции для раздельного и совместного привода манипулятора и харвестерной головки может достигать 23%.

Рост энергонасыщенности привода наряду с увеличением производительности операции приводит к соответствующему повышению динамической нагруженности технологического оборудования в фазах разгона и торможения дерева. Поэтому, даже при сохранении массо-размерных характеристик технологического оборудования следует обязательно оценивать соответствующие изменения нагрузок и напряженно-деформированного состояния несущих конструкций, воспринимающих их.

Так, значительные динамические нагрузки возникают в конце операции обрезки сучьев при торможении дерева подающим механизмом. Они распространяется на раму харвестерной головки, механизм ее подвеса, звенья манипулятора, их гидравлический привод, несущую конструкцию машины и т.д. Исследование процесса торможения деревьев позволило выделить 2 характерных максимума на кривых поперечного усилия в подвесе харвестерной головки (рисунок 5).

Первый, обычно также наибольший, возникает для деревьев, имеющих наибольшую кинетическую энергию к моменту торможения, обеспеченную подающим механизмом соответствующей мощности. Второй максимум обусловлен эффектом резонанса ввиду возникновения следующей последовательности событий. В начальный момент времени под действием подающего механизма харвестерная головка отклоняется от вертикального положения в направлении противоположном направлению подачи. Это происходит до тех пор, пока горизонтальное усилие в ее подвесе не станет больше величины силы сопротивления волочению кроны дерева и оно не сдвинется с места. Далее, центр тяжести дерева начинает смещаться ближе к харвестерной головке, происходит соответствующее уменьшение опорной реакции кроны и подвес харвестерной головки начнет перемещаться в исходное вертикальное положение. Торможение дерева в этот момент приводит к совпадению направлений векторов скорости харвестерной головки с деревом и скорости дерева относительно головки до момента начала торможения. Такое сочетание вызывает рост горизонтальной реакции в подвесе (рисунок 5 а).

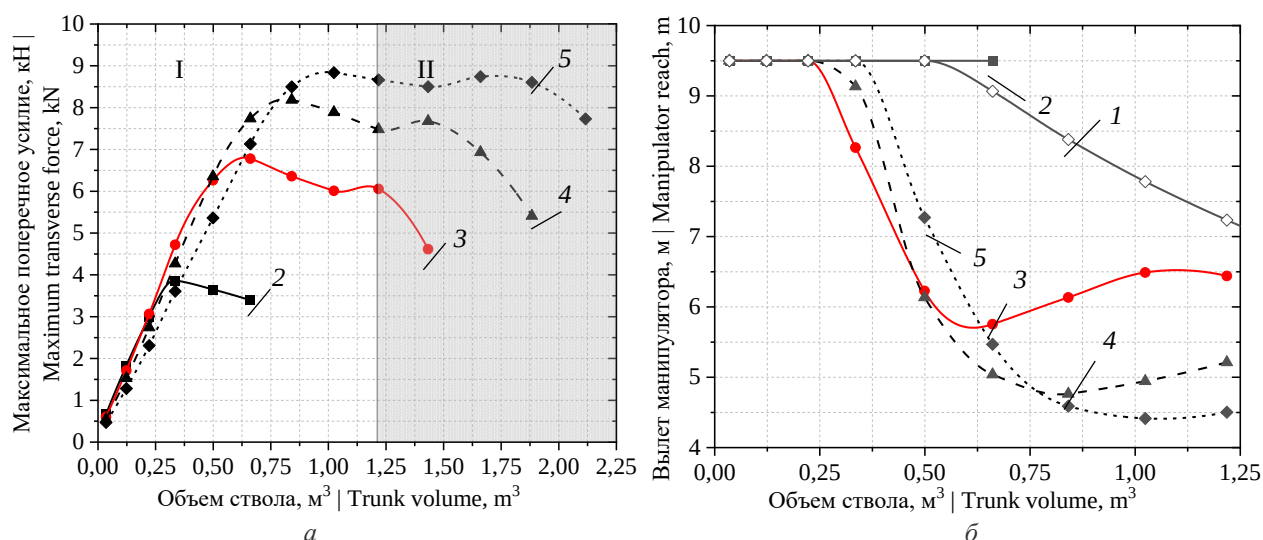


Рисунок 5. Максимальные горизонтальные реакции в подвесе харвестерной головки массой 860 кг при торможении в ней дерева с соответствующим объемом ствола при совокупной гидравлической мощности привода 90 кВт, давлении в гидросистеме до 21 МПа (а) и ограничение рабочего вылета манипулятора (б): 1 – на операции валки дерева, 2–5 – на операции обрезки сучьев при объеме гидромоторов подающих вальцов: 2 – 470 см³; 3 – 565 см³; 4 – 650 см³; 5 – 750 см³

Figure 5. Maximum horizontal reactions in the suspension of a harvester head weighing 860 kg during braking of a tree with a corresponding stem volume inside it, with a total hydraulic drive power of 90 kW and hydraulic system pressure up to 21 MPa (a), and limitation of the manipulator working reach (b): 1 – during the tree felling operation; 2–5 – during the delimbing operation with the following displacement volumes of the feed roller hydraulic motors: 2 – 470 cm³; 3 – 565 cm³; 4 – 650 cm³; 5 – 750 cm³

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Уменьшение рассмотренной нагрузки за счет более плавного торможения сложно реализуемо на практике, ввиду необходимости остановки дерева в строго установленном размере длин выпиливаемых лесоматериалов. Диапазон отклонений по длине, как правило, не превышает 0,05 – 0,07 м. При этом возможно использование ступенчатого снижения скорости подачи. Однако такой подход влияет на общую продолжительность выполнения операции, энергопотребление привода, и, соответственно, на достигаемые величины производительности и ЧЭПП_{ос}, (рисунок 4 з), что требует дополнительного анализа.

Важность учета нагрузок на операции обрезки сучьев при схематизации нагружения манипулятора харвестера обусловлена следующим. Динамические

поперечные усилия действуют на опорную платформу манипулятора лишь на операциях перемещения дерева, холостого перемещения манипулятора и обрезки сучьев. В первых двух случаях оно обусловлено величиной крутящего момента, реализуемого приводом поворотного механизма манипулятора (для рассматриваемой конструкции – до 39 кН·м), что на максимальном вылете соответствует статическому боковому усилию на подвесе харвестерной головки 4,1 кН. Однако отмеченные на рисунке 5 а величины максимальных поперечных усилий превосходят данный показатель в 1,64 раза (для гидромоторов подающих вальцов 565 см³). Поэтому вылет манипулятора, на котором производится обрезка сучьев следует ограничивать (рисунок 5 б).

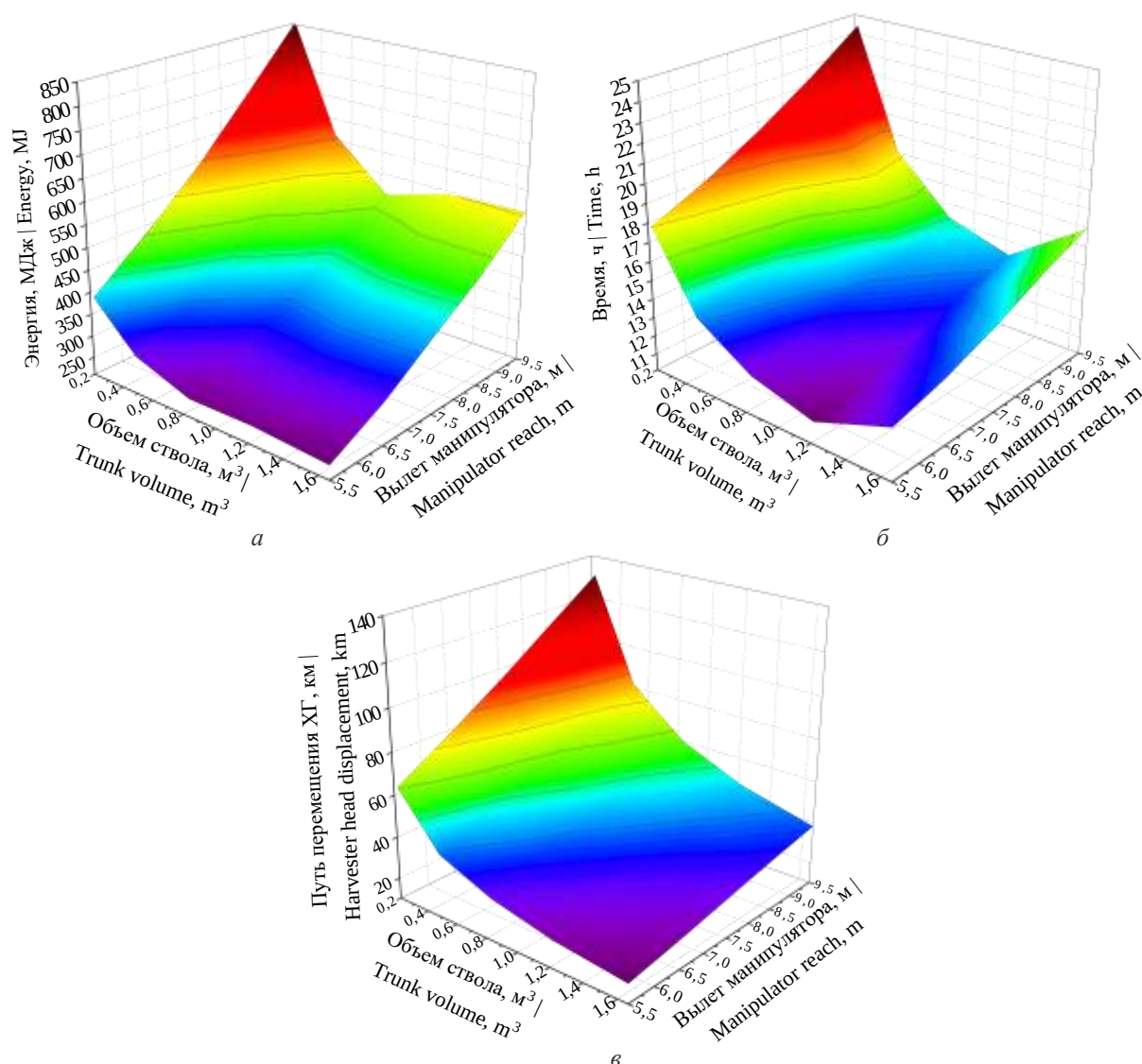


Рисунок 6. Характеристики работы манипулятора харвестера на операции перемещения им харвестерной головки на лесосеке площадью 5 га с полной соснового древостоя равной 1, вариативности его рабочих вылетов и объемов стволов деревьев:

a – энергоёмкость, МДж; *б* – затраты времени, ч; *в* – путь перемещения харвестерной головки, км

Figure 6. Performance characteristics of the harvester manipulator during the operation of moving the harvester head on a felling area of 5 ha with a pine stand fullness equal to 1, variability of its working reaches and tree stem volumes:

a – energy intensity, MJ; *b* – time consumption, h; *c* – travel distance of the harvester head, km

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Исследования показали, что энергетическая и временная структура технологического цикла харвестера существенно зависит от выбранного рабочего вылета манипулятора. С его увеличением от 5,5 м до 9,5 м нелинейно сокращается совокупное расстояние ($I_{\text{двх}}$), которое харвестер должен преодолеть для разработки заданного участка леса (с 4,5 км до 2,6 км). Также сокращается количество требуемых технологических стоянок $n_{\text{тсх}}$ (с 1300 до 350). Нелинейно снижаются затраты времени на переезды с 2,25 ч до 1,1 ч с и энергии для их совершения с 225 МДж до 62 МДж (для грунтов II категории). Одновременно затраты на перемещение самого

манипулятора напротив увеличиваются как показано на рисунке 6. Важно, что указанные показатели не имеют экстремумов для величины вылета манипулятора, что не позволяет однозначно выбрать его рациональное значение.

Отдельная оценка ЧЭПП_{пер} (рисунок 7 *a*) указывает на максимальную эффективность переместительных операций при минимальном вылете манипулятора. Поэтому она также не может использоваться обособленно для определения его рациональной величины. Только при совокупной оценке операций перемещения харвестерной головки и движения харвестера в целом, как процессов с

взаимозависимыми параметрами технологического процесса, удастся определить некоторый экстремум для функции ЧЭПП_{пер+движ}. Для объемов стволов объемом свыше 1,25 м он лежит в диапазоне 6,0 – 7,0 м.

Однако снижение вылета манипулятора харвестера может приводить к уменьшению концентрации круглых лесоматериалов на

технологической стоянке. Это приводит к росту количества операций форвардера. Поэтому, для увеличения эффективности работы комплекса МЛМ должно выполняться условие: прирост эффективности форвардера за счет концентрации круглых лесоматериалов должен быть больше, чем падение эффективности харвестера.

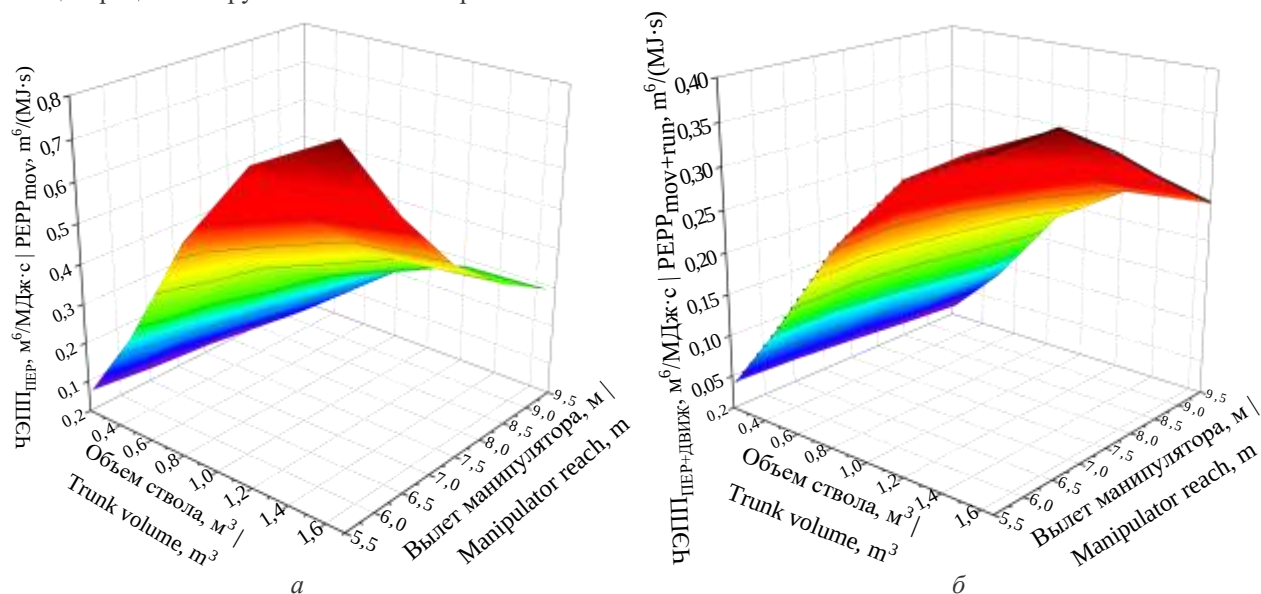


Рисунок 7. ЧЭПП_{пер} (м⁶/МДж·с) операции по перемещению харвестерной головки манипулятором (а) и показатель ЧЭПП_{пер+движ} (м⁶/МДж·с) совокупности операций перемещения харвестерной головки и движения харвестера (б) при заготовке 1 м³ круглых лесоматериалов
Figure 7. PEPP (m⁶/(MJ·s)) of the operation of moving the harvester head by the manipulator (а) and the PEPP+MOVE indicator (m⁶/(MJ·s)) for the set of operations of moving the harvester head and moving the harvester (b) when harvesting 1 m³ of round timber

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Для оценки эффективности с учетом взаимовлияния технологических операций проведено сравнение работы широко используемых в Республике Беларусь харвестеров: Vimek 404 T6 с харвестерной головкой Keto 51, Belarus-Sampo MЛХ 1046 с харвестерной головкой Kesla 18 RH и Амкодор 2551 с харвестерной головкой Kesla 25 RH II (рисунок 8).

Данные приведены для условий работы с сосной Iа класса бонитета, на грунтах II категории, равнинной местности, отсутствии подроста. При определении максимального объема ствола, обрабатываемого каждым харвестером (рисунок 8 а) учитывалась возможность совмещения работы манипулятора с харвестерной головкой на операции обрезки сучьев, а также возможность освобождения харвестерной головки от ствола во время его валки.

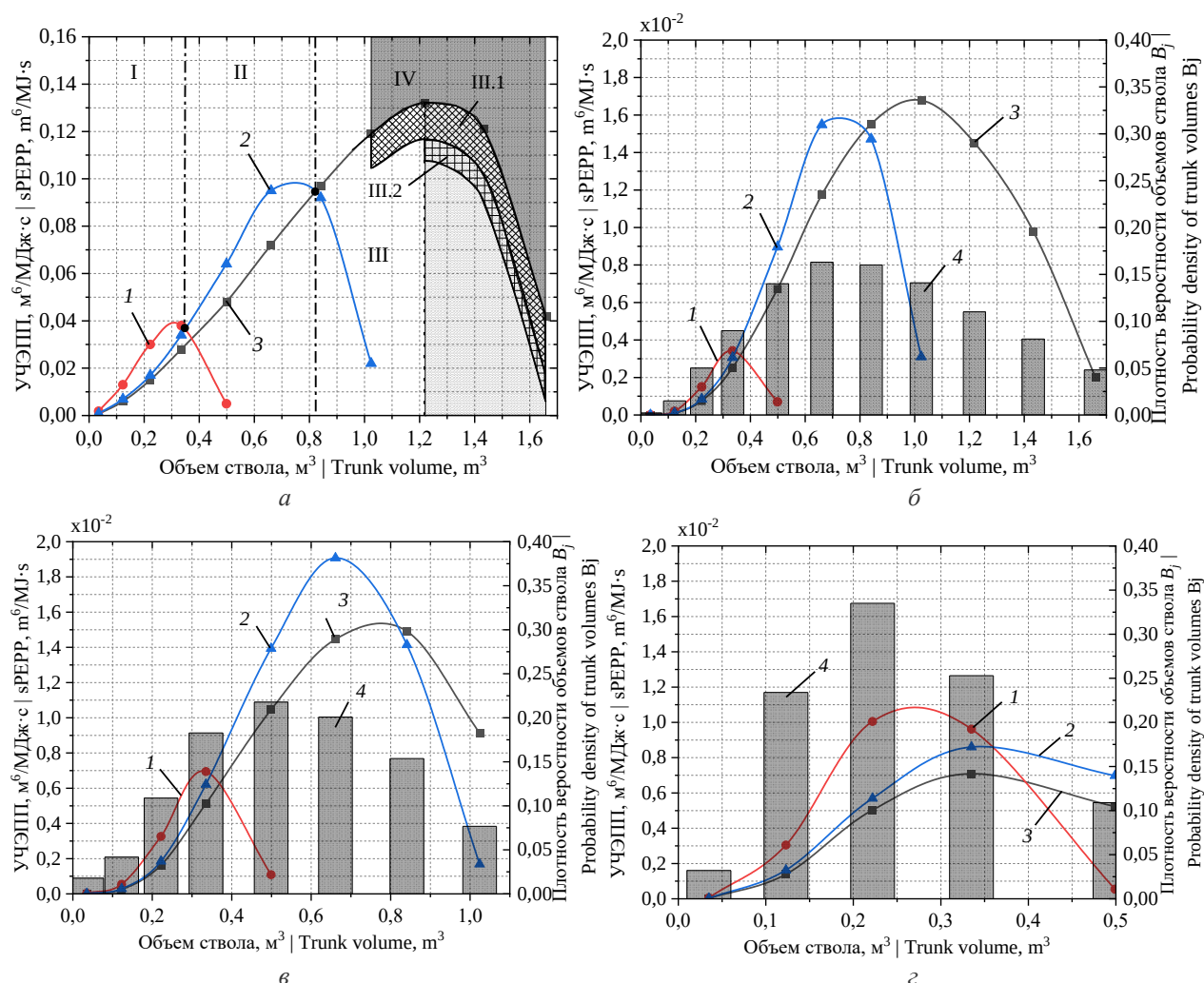


Рисунок 8. Эффективность совокупности операций технологического цикла харвестеров: движение, перемещение харвестерной головки манипулятором, обрезка сучьев и раскряжевка по показателю удельного энергетического потенциала производительности:

а – без учета распределения условий эксплуатации $B(d)$; *б–г* – вклад каждого из условий при соответствующей плотности вероятности $B(d)$ работы в них

1 – Vimek 404 T6 с харвестерной головкой Keto Forst Supreme V4; 2 – Belarus-Sampo МЛХ 046 с харвестерной головкой Kesla 18 RH; 3 – Амкодор 2551 с харвестерной головкой Kesla 25 RH II

Figure 8. Efficiency of the set of operations in the technological cycle of harvesters: movement, movement of the harvester head by the manipulator, delimbing, and bucking, according to the indicator of specific energy potential of productivity: *a* – without considering the distribution of operating conditions $B(d)$ $B(d)$;

(*b–d*) – contribution of each condition with the corresponding probability density $B(d)$ of operation under them
1 – Vimek 404 T6 with Keto Forst Supreme V4 harvester head; 2 – Belarus-Sampo MLH 046 with Kesla 18 RH harvester head; 3 – Amkodor 2551 with Kesla 25 RH II harvester head

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Заметно, что при объемах ствола до $0,82 \text{ м}^3$ харвестер Амкодор 2551 уступает в эффективности харвестеру Belarus-Sampo МЛХ 046, а при объемах ствола до $0,38 \text{ м}^3$ также харвестеру Vimek 404 Т6. К примеру, при объеме ствола $0,5 \text{ м}^3$ эксплуатация харвестера Belarus-Sampo МЛХ 046 до 33% более эффективна в сравнении с Амкодор 2551. Однако отметим, что характеристики (рисунок 8 а) даны для каждого объема ствола в отдельности.

Можно заметить (рисунок 8 б–з), что наибольший вклад в совокупную эффективность работы харвестеров вносят деревья с величинами объемов стволов, часто отличающихся от максимальных, средних, и наиболее распространенных. Так, при работе в древостое с объемами стволов до $1,66 \text{ м}^3$ наибольший вклад в эффективность харвестера Амкодор 2551 вносят деревья с объемом ствола близкими к 1 м^3 . При этом наиболее распространены на лесосеке деревья объемом ствола $0,6–0,8 \text{ м}^3$.

В соответствии с критерием УЭППХ совокупная эффективность работы харвестера в стохастических условиях определяется как сумма величин УЭППХ в каждом из них. Альтернативой обособленного использования харвестера Амкодор 2551, для условий, отмеченных на рисунке 8 б, является применение технологического процесса, в котором предварительно с деревьями объемом до $0,8 \text{ м}^3$, работает харвестер Belarus-Sampo МЛХ 046. Такая совместная работа харвестеров до 8,5% более эффективна в сравнении с обособленным использованием харвестера Амкодор 2551. Заготовка лесоматериалов в условиях, отмеченных на рисунке 8 в возможна харвестерами Belarus-Sampo МЛХ 1046 и Амкодор 2551. Эффективность их применения сопоставима. При этом совместная последовательная работа этих машин эффективнее на 14,4–16,9%.

В древостоях с объемом ствола до $0,5 \text{ м}^3$ (рисунок 8 з) применение харвестера Belarus-Sampo МЛХ 046 для сплошнолесосечных рубок на 1,7% эффективнее в сравнении с Vimek 404Т6 несмотря на то, что до объема ствола $0,35 \text{ м}^3$ выражена большая эффективность харвестера Vimek 404Т6. Совместная работа данных харвестеров до 23% более эффективна. При этом важно дополнительно учесть затраты на перебазировку машин.

Обсуждение

Задачи, поставленные в статье реализованы, а цель исследования достигнута полностью. Важным итогом является подтверждение возможности использования разработанной энергетической концепции создания и применения комплексов МЛМ для анализа эффективности работы харвестеров.

Предложенная концепция позволяет:

- комплексно учитывать технические и технологические факторы одновременно влияющие на изменение производительности, энергетических затрат и нагруженности конструкций харвестеров;
- оценивать их вклад в достигаемый уровень эффективности и выбирать более рациональные из них для достижения целевого показателя, в качестве которого предлагается использовать величину удельного энергетического потенциала производительности, являющегося количественной мерой уровня энергозатрат для обеспечения требуемой величины долговременной производительности.

Подходы, использованные в концепции универсальны, и позволяют анализировать эффективность работы не только харвестеров, но и других одно- и многооперационных лесозаготовительных машин их комплексов. На ее основе возможно построение высокоэффективных «сквозных» технологических процессов в цепи механизированных лесохозяйственных мероприятий от посадки лесных культур до проведения рубок главного пользования.

Важным аспектом реализации концепции является получение взаимосвязанных данных о рассмотренных показателях для такого технологического процесса с параллельным моделированием работы каждой машины. Данные о энергетических и временных затратах в вариативности условий и технологий также могут быть получены экспериментально. Для современных лесозаготовительных машин, приводы которых гидрофицированы, это не представляет значительной сложности. Подобные исследования уже проведены автором для комплекса машин «харвестер+форвардер», а отдельные их результаты хорошо согласуются с исследованиями Рукомойникова К. П., Свойкина Ф.В., Сюнева В.С., Селиверстова А.А., Ширнина Ю.А., Клубничкина В.Е., Попикова П. И., Драпалюка М. В., Бартенева И. М. и других ученых.

Между тем, сложность полной реализации концепции заключается в получении исходных данных о эксплуатационной надежности машин конкретного технического исполнения в различных условиях и технологиях применения. Многооперационные машины являются значительно менее массовыми, чем, к примеру, сельскохозяйственные трактора. Их объем в Республике Беларусь в структуре Министерства лесного хозяйства приближается лишь к 500 единицам разных моделей, что позволяет накопить статистически значимые выборки лишь по отдельным харвестерам (к примеру, Амкодор 2551, Vimek 404 Т6, Belarus-Sampo МЛХ 046).

Отмеченное требует дальнейшей разработки точных теоретических методов такой оценки.

Одним из важных направлений дальнейших исследований также видится исследование когнитивных возможностей операторов многооперационных лесозаготовительных машин, как одного из основных факторов, влияющих на все рассмотренные в статье показатели эксплуатационной эффективности. Представляют научный интерес исследования, направленные на развитие систем частичной автоматизации действий операторов, позволяющих выполнять операции по заранее заданному рациональному алгоритму и исключаяющие ошибки в принятии решений по управлению машинами.

Заключение

Исследованиями установлено, что равное повышение уровня производительности комплексов МЛМ за счет изменения конструктивных и энергетических параметров, технологий работы, способов, приемов и режимов выполнения операций, достигается с разной энергетической эффективностью. Их рациональность оценена с помощью интегрального технического критерия – УЭППх.

Установлены закономерности нелинейного изменения:

- затрат энергии (от 93,2 до 117,3 кДж), времени (от 3,4 с до 15,2 с) и динамической нагруженности подвесной скобы харвестерной головки (коэффициент динамичности 1,22–2,3) для различных вариантов совмещения операций валки и перемещения деревьев к месту раскряжевки;

- удельной энергоемкости и производительности операции обрезки сучьев с деревьев сосны харвестерной головкой от 2,23–2,51 МДж/м³ и 0,025–0,051 м³/с при объеме ствола 0,12 м³ до 0,42–0,47 МДж/м³ и 0,09–0,147 м³/с при объеме ствола 1,43 м³ и реализуемой мощности на подающих вальцах 26–89 кВт.

Предложен технологический процесс последовательного применения на одной лесосеке харвестеров разных размерно-энергетических классов, которая на 14,4–16,9% эффективнее в сравнении с технологией их обособленного применения в условиях лесосек, имеющих значительную стохастичность объёмов стволов (технология реализована в техническом кодексе установившейся практики ТКП 680-2024 «Технологии разработки лесосек комплексами многооперационных лесозаготовительных машин»).

Список литературы

1. Сергеева Т. В. Производственная оценка влияния количественных характеристик состава древостоя на элементы времени цикла работы харвестера. *Инновации и технологии в лесном хозяйстве*. 2024;1: 289–293. DOI: 10.21178/160524.289. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68615716>.
2. Routa J., Nuutinen Y., Asikainen A. Productivity in Mechanizing Early Tending in Spruce Seedling Stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2020;1: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.619>.
3. Szewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N. [et. al.]. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions. *Silva Fennica*. 2020;3 (54): 10355. – DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10355>.
4. Borz S.A., Marcu M.V., Cataldo M.F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder Prototype under Conditions of Steep-Terrain Low-Access Forests. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2021;42: 16. – DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1183096>.
5. Будник П.В. Синтез технико-технологических решений комплексного освоения ресурсов древесины. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук 05.21.01. 2021;45. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54430194>.
6. Budnik P., Shegelman Y., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. *Central European Forestry Journal*. 2020;66: 12–22. DOI: 10.2478/forj-2019-0027.
7. Клубничкин Е. Е. Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки. *Лесной вестник/Forestry Bulletin*. 2025;1(29). 112–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-112-125. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80474162>.
8. Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Соколова В.А. [и др.]. Повышение производительности неспециализированной техники на лесозаготовках на базе математического анализа показателей лесосеки. *Системы. Методы. Технологии*. 2021;3(51): 135-142. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-135-142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46621685>.
9. Soman H., Kizha A.R., Delgado B.M., Kenefic L.S., Kanoti K. Production economics: comparing hybrid tree-length with whole-tree harvesting methods. *Forestry*. 2020; 3 (93): 389–400. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz065>.
10. Simon A., Talbot B., Astrup R. The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(1): 22–32. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1981046>.
11. Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю. В., Сенькин В.А. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин. *Лесной вестник*. 2023;2(1): 139-152. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-1-139-152>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50188359>.
12. Рукомойников К.П., Купцова В.О., Сергеева Т. В. Математическая модель расхода топлива форвардера «Амкодор-2682» при выполнении лесохозяйственных работ. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020; 6: 148-158. DOI:10.37482/0536-1036-2020-6-148-158. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44411168>.
13. Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020;3: 117-127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42916019>.
14. Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калига Г.А. и др. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера. *Лесной вестник*. 2022;26(5): 93-101. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49515846>.
15. Polowy K., Molińska-Glura M. Data Mining in the Analysis of Tree Harvester Performance Based on Automatically Collected Data. *Forests*. 2023; 14: 165. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010165>.
16. Якимович С.Б., Ефимов Ю.В. Оценка эффективности систем машин и харвестерных агрегатов для заготовки древесины по фундаментальному критерию технолога — удельной энергоёмкости. *Лесной вестник*. 2020;24(1): 59-68. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-1-59-68>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42736877>.
17. Савиных Т.И., Савиных М.А., Якимович С.Б. Сравнительный анализ способов заготовки древесины харвестером по критерию производительности и удельной энергоёмкости // *Леса России и хозяйство в них*. – 2021. – № 4(79). – С. 69-74. – DOI: 10.51318 / FRET.2021.95.37.006. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47479680>.
18. Hatton B., Gagnol V., Bouzgarrou B.C., Fauroux J.-C. Modelling and simulation of a harvester head mechanism. *Mechanics & Industry*. 2017;18: 309. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2016055>.
19. Mergl V., Zemánek T., Šušnjar M., Klepárník J. Efficiency of Harvester with the Debarking Head at Logging in Spruce Stands Affected by Bark Beetle Outbreak. *Forests*. 2021;12: 1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101348>.
20. Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(2): 108-118. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2044724>.

21. Sirén M., Bergkvist I., Skogforsk J., et al. Efficient forestry by precision planning and management for sustainable environment and cost-competitive bio-based industry: Ref. Ares(2018)4460965 - 30/082018. Natural Resources Institute Finland, 2019; 23. DOI: <https://doi.org/10.3030/720712>.
22. Егорин А.А. Исследование воздействия движителей харвестеров на лесные почвогрунты с учетом возникающих динамических нагрузок: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 4.3.4. С.-Петербург. гос. лесотехн. ун-т. 2023; 19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59958698>.
23. Клубничкин Е.Е. Моделирование колесных транспортных средств, оснащенных средствами повышения проходимости. Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023;1: 84-96. DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_84.
24. Карпачев С.П., Быковский М.А., Лаптев А.В. Методика выбора манипулятора харвестера. Лесной вестник. 2021;25(1): 123-129. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-123-129>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44711896>.
25. Коростелев С.А., Горбачев А.В., Клубничкин В.Е. Исследование тяговых характеристик колесных лесохозяйственных машин. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022;184: 77-88. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-184-009>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50208185>.
26. Лавров А.В., Воронин В.А., Сидоров М.В., Пехальский И.А. Тяговый расчет модульного энерготехнологического средства с учетом кинематического несоответствия привода ведущих осей. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022;16(2):30-36. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48729864>.
27. Holzleitner F. Integrated in-stand debarking with a harvester in cut-to-length operations – processing and extraction performance assessment / Franz Holzleitner, Christian Kanzian // International journal of forest engineering. – 2022. – Vol. 33, № 1. – P. 66–79. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.2013049>.
28. Ширнин Ю.А., Гайсин И.Г., Рыганова С.Г., Гатауллин А.Р. Сравнение и выбор вариантов выполнения элементов технологических операций при работе системы машин «харвестер+форвардер». Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2021;2(50):42-51. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.2.42>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46262589>.
29. Прядкин В.И., Бартенев И.М. Эколого-экономическая оценка применения сортиментной технологии заготовки древесины на рубках ухода. Лесотехнический журнал. 2018;8(4): 250-259. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a323ff0ed79.44618896. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36574564>.
30. Голякевич С.А., Гороновский А.Р., Коробкин В.А. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин. Труды БГТУ. 2024;1(276): 125-131. DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-17>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60046817>.

References

1. Sergeeva T. V. Proizvodstvennaya otsenka vliyaniya kolichestvennykh kharakteristik sostava drevostoya na elementy vremeni tsikla raboty kharvestera. [Production assessment of the influence of stand composition quantitative characteristics on the harvester cycle time elements]. Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaystve=Innovations and Technologies in Forestry. 2024;1: 289-293. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/160524.289>.
2. Routa J., Nuutinen Y., Asikainen A. Productivity in Mechanizing Early Tending in Spruce Seedling Stands. Croatian Journal of Forest Engineering. 2020;1: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.619>.
3. Szewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N., et al. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions. Silva Fennica. 2020;54(3):10355. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10355>.
4. Borz S.A., Marcu M.V., Cataldo M.F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder Prototype under Conditions of Steep-Terrain Low-Access Forests. Croatian Journal of Forest Engineering. 2021; 42:16. DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1183096>.
5. Budnik P. V. Sintez tekhniko-tehnologicheskikh resheniy kompleksnogo osvoeniya resursov drevesiny. [Synthesis of technical and technological solutions for integrated development of wood resources]. Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. 2021;45. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54430194>.
6. Budnik P., Shegelman Y., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. Central European Forestry Journal. 2020;66: 12-22. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0027>.
7. Klubnichkin E. E. Metod povysheniya energoeffektivnosti pogruzochno-transportnykh mashin dlya sortimentnoy zagotovki. [Method for improving energy efficiency of loading and transport machines for cut-to-length harvesting]. Lesnoy vestnik=Forestry Bulletin. 2025;1:112-125. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-112-125>.
8. Svoikin F. V., Svoikin V. F., Sokolova V. A., et al. Povyshenie proizvoditel'nosti nespetsializirovannoy tekhniki na lesozagotovkakh na baze matematicheskogo analiza pokazateley lesoseki. [Increasing productivity of non-specialized equipment

in logging based on mathematical analysis of cutting area indicators]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies. 2021;3: 135-142. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-3-135-142>.

9. Soman H., Kizha A.R., Delgado B.M., Kenefic L.S., Kanoti K. Production economics: comparing hybrid tree-length with whole-tree harvesting methods. *Forestry*. 2020;93(3):389-400. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz065>

10. Simon A., Talbot B., Astrup R. The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(1):22-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1981046>.

11. Sokolov A. P., Seliverstov A. A., Sukhanov Yu. V., Sen'kin V. A. O vliyani chastichnoy avtomatizatsii upravleniya manipulyatorami na ergonomicheskie pokazateli lesozagotovitel'nykh mashin. [On the influence of partial automation of manipulator control on ergonomic indicators of logging machines]. *Lesnoy vestnik*= Forest Bulletin. 2023;2:139-152. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-1-139-152>.

12. Rukomoynikov K. P., Kuptsova V. O., Sergeeva T. V. Matematicheskaya model' raskhoda topliva forwardera «Amkodori-2682» pri vypolnenii lesokhozyaystvennykh rabot. [Mathematical model of fuel consumption of forwarder "Amkodori-2682" during forestry works]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*= Forestry Journal. 2020;6:148-158. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-148-158>.

13. Rukomoynikov K. P., Kuptsova V. O. Obosnovanie norm raskhoda topliva mnogooperatsionnykh lesozagotovitel'nykh mashin na primere kharvestera. [Substantiation of fuel consumption rates for multi-operation logging machines using the example of a harvester]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*= Forestry Journal. 2020;3:117-127. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-117-127>.

14. Mokhiev A. P., Kunitskaya O. A., Kalita G. A., et al. Otsenka nadezhnosti lesozagotovitel'nogo kharvestera. [Reliability assessment of a logging harvester]. *Lesnoy vestnik*= Forest Bulletin. 2022;5:93-101. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>.

15. Polowy K., Molińska-Glura M. Data Mining in the Analysis of Tree Harvester Performance Based on Automatically Collected Data. *Forests*. 2023;14:165. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010165>.

16. Yakimovich S. B., Efimov Yu. V. Otsenka effektivnosti sistem mashin i kharvesternykh agregatov dlya zagotovki drevesiny po fundamental'nomu kriteriyu tekhnologa — udel'noy energoemkosti. [Evaluation of the efficiency of machine systems and harvester units for timber harvesting according to the fundamental criterion of technologist — specific energy intensity]. *Lesnoy vestnik*. 2020;1:59-68. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-1-59-68>.

17. Savinykh T. I., Savinykh M. A., Yakimovich S. B. Sravnitel'nyy analiz sposobov zagotovki drevesiny kharvesterom po kriteriyu proizvoditel'nosti i udel'noy energoemkosti. [Comparative analysis of timber harvesting methods by harvester based on productivity and specific energy intensity]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh*= Forests of Russia and Their Management. 2021;4(79):69-74. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2021.95.37.006>.

18. Hatton B., Gagnol V., Bouzgarrou B.C., Fauroux J.-C. Modelling and simulation of a harvester head mechanism. *Mechanics & Industry*. 2017;18:309. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2016055>.

19. Mergl V., Zemánek T., Šušnjar M., Klepárník J. Efficiency of Harvester with the Debarking Head at Logging in Spruce Stands Affected by Bark Beetle Outbreak. *Forests*. 2021;12:1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101348>.

20. Heppelmann J.B., Talbot B., Antón Fernández C., Astrup R. Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(2):108-118. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2044724>.

21. Sirén M., Bergkvist I., Skogforsk J., et al. Efficient forestry by precision planning and management for sustainable environment and cost-competitive bio-based industry. *Natural Resources Institute Finland*, 2019; 23. DOI: <https://doi.org/10.3030/720712>.

22. Egorin A. A. Issledovanie vozdeystviya dvizhiteley kharvesterov na lesnye pochvogruntu s uchedom voznikayushchikh dinamicheskikh nagruzok. [Study of the impact of harvester propellers on forest soils taking into account emerging dynamic loads]. *Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk*. 2023; 19. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59958698>.

23. Klubnichkin E. E. Modelirovanie kolesnykh transportnykh sredstv, osnashchennykh sredstvami povysheniya prokhodimosti. [Modeling of wheeled vehicles equipped with means of increasing cross-country ability]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*= Proceedings of NGTU R.E. Alekseev. 2023;1: 84-96. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_84.

24. Karpachev S. P., Bykovskiy M. A., Laptev A. V. Metodika vybora manipulyatora kharvestera. [Method for selecting a harvester manipulator]. *Lesnoy vestnik*. 2021;1: 123-129. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-123-129>.

25. Korostelev S. A., Gorbachev A. V., Klubnichkin V. E. Issledovanie tyagovykh kharakteristik kolesnykh lesokhozyaystvennykh mashin. [Study of traction characteristics of wheeled forestry machines]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2022;184: 77-88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-184-009>.

26. Lavrov A. V., Voronin V. A., Sidorov M. V., Pekhal'skiy I. A. Tyagovyy raschet modul'nogo energotekhnologicheskogo sredstva s uchetom kinematicheskogo nesootvetstviya privoda vedushchikh osey. [Traction calculation of a modular energy-technological means taking into account kinematic mismatch of the drive of driving axles]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*= *Agricultural Machines and Technologies*. 2022;16(2): 30-36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36>.

27. Holzleitner F., Kanzian C. Integrated in-stand debarking with a harvester in cut-to-length operations – processing and extraction performance assessment. *International Journal of Forest Engineering*. 2022;33(1):66-79. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.2013049>.

28. Shirnin Yu. A., Gaysin I. G., Ryganova S. G., Gataullin A. R. Sravnenie i vybor variantov vypolneniya elementov tekhnologicheskikh operatsiy pri rabote sistemy mashin «kharvester+forwarder». [Comparison and selection of options for performing elements of technological operations when operating a machine system "harvester+forwarder"]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*=*Bulletin of the Volga State Technological University*. 2021;50(2): 42-51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.2.42>.

29. Pryadkin V. I., Bartenev I. M. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka primeneniya sortimentnoy tekhnologii zagotovki drevesiny na rubkakh ukhoda. [Ecological and economic assessment of the use of cut-to-length technology in thinning]. *Lesotekhnicheskyy zhurnal*= *Forestry Engineering Journal*. 2018;8(4): 250-259. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a323ff0ed79.44618896.

30. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R., Korobkin V. A. Metodika prognozirovaniya effektivnosti kompleksov lesozagotovitel'nykh mashin. [Method for predicting the efficiency of logging machine complexes]. *Trudy BGTU*=*Proceedings of BSTU*. 2024;276(1): 125-131. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-17>.

Сведения об авторах

✉ *Голякевич Сергей Александрович* – кандидат, техн. наук, доцент, доцент кафедры лесных машин дорог и технологий лесопромышленного производства Белорусского государственного технологического университета, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5095-8725>, e-mail: gsa@belstu.by.

Information about the authors

✉ *Golyakevich Sergey A.* – PhD. Engineering, senior lecturer, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology, Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, Republic of Belarus, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5095-8725>, e-mail: gsa@belstu.by.

✉ Для контактов / Corresponding author



Оценка гидродинамического влияния корпуса буксировочного лесотранспортного модуля на условия работы движителей

Сергей В. Посыпанов¹, s.posypanov@narfu.ru, 0000-0003-0600-7089
Никита С. Калитин¹, kalitin.n@edu.narfu.ru

¹ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация

Теоретически обоснованно, что эмпирическая формула, обычно применяемая для определения коэффициента, учитывающего гидродинамическое влияние корпуса судна на условия работы движителей, применительно к рассматриваемому модулю, предназначенному для буксировки лесотранспортных единиц по средним и малым рекам, может давать существенные погрешности. Это объясняется нетипичным для обычных судов соотношением водоизмещения и диаметра винтов, наличием сжатого потока между понтонами плавучего основания катамаранного типа и размещением винтов за пределами поперечных габаритов понтонов, что ослабляет влияние попутного потока. В результате численного эксперимента, базирующегося на методе конечных элементов, с использованием программы SOLIDWORKS Flow Simulation подтверждены теоретические положения. При обработке данных по характерным продольным сечениям установлено, что в межпontonном пространстве скорость потока не уменьшается, а увеличивается и лишь на некотором удалении от кормы начинает уменьшаться, оставаясь на значительном расстоянии меньше относительной скорости модуля. Это объясняется тем, что в межпontonном пространстве и непосредственно за ним фактор сжатия потока более значим, чем фактор наличия попутного потока. По данным ряда поперечных сечений получены аппроксимирующие зависимости для определения скоростей по координатам в сечении. С помощью этих зависимостей по специально разработанному алгоритму для каждого поперечного сечения вычислены средние скорости в пределах круглых контуров, соответствующих расположению одного винта в диаметральной плоскости и двух винтов симметричных относительно её. По ним установлены значения искомого коэффициента. При размещении движителей в межпontonном пространстве его следует принимать – 0,08 ... - 0,09 при установке одного винта и – 0,09 ... - 0,11 при установке двух. Для его определения при установке винтов за кормой модуля получены аппроксимирующие зависимости. Диапазон изменения коэффициента за кормой от -0,08 до 0,06 при изменении расстояния от миделя от 3,25 до 4,90 м. Даны рекомендации по определению мест установки движителей, учитывающие наряду со скоростным режимом и другие факторы.

Ключевые слова: лесосплав, лесотранспортные единицы, буксировка, гребной винт, попутный поток, сжатие потока

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Посыпанов, С. В. Оценка гидродинамического влияния корпуса буксировочного лесотранспортного модуля на условия работы движителей / С. В. Посыпанов, Н. С. Калитин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 204–216. – Библиогр.: с. 214–216 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/13>.

Поступила .05.02.2026. Пересмотрена 30.03. 2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

Article

Evaluation of the hydrodynamic Influence of the Hull of a towing timber transport Module on the operating Conditions of the Propellers

Sergey V. Posypanov¹, s.posypanov@narfu.ru, Researcher ID: ABF-6542-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Nikita S. Kalitin¹, kalitin.n@edu.narfu.ru

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

It is theoretically justified that the empirical formula, usually used to determine the coefficient that takes into account the hydrodynamic influence of the vessel's hull on the operating conditions of the propellers, as applied to the module under consideration, designed for towing timber transport units along medium and small rivers, can give significant errors. This is explained by the ratio of displacement to propeller diameter, which is atypical for conventional vessels, the presence of a compressed flow between the pontoons of the catamaran-type floating base, and the placement of the propellers outside the transverse dimensions of the pontoons, which weakens the influence of the following flow. As a result of a numerical experiment based on the finite element method using the SOLIDWORKS Flow Simulation program, the theoretical propositions were confirmed. When processing data on characteristic longitudinal sections, it was found that in the inter-pontoon space the flow velocity does not decrease, but increases, and only at some distance from the stern does it begin to decrease, remaining at a significant distance less than the relative velocity of the module. This is explained by the fact that in the inter-pontoon space and immediately behind it, the flow compression factor is more significant than the factor of the presence of a passing flow. Based on data from a number of cross sections, approximating dependencies were obtained for determining the velocities by coordinates in the section. Using these dependencies, a specially developed algorithm was used to calculate average speeds within circular contours for each cross-section, corresponding to the location of one propeller in the diametrical plane and two propellers symmetrical relative to it. The values of the required coefficient are established based on them. When placing propellers in the inter-pontoon space, it should be taken as - 0.08...- 0.09 when installing one propeller and - 0.09...- 0.11 when installing two. To determine this when installing propellers behind the stern of the module, approximating dependencies were obtained. The range of change of the coefficient behind the stern is from -0.08 to 0.06 when the distance from the midship changes from 3.25 to 4.90 m. Recommendations are given for determining the locations of installation of propellers, taking into account, along with the speed, other factors.

Keywords: *timber rafting, timber transport units, towing, propeller, consequential flow, flow compression*

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

For citation: Posypanov S. V., Kalitin N. S. (2026) Evaluation of the hydrodynamic Influence of the Hull of a towing timber transport Module on the operating Conditions of the Propellers. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 204–216 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/13>.

Received 05.02.2026. **Revised** 30.03.2026. **Accepted** 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Буксировочный модуль [1], разрабатываемый для транспортировки лесоматериалов по средним и малым рекам, представляет собой плавучее основание катамаранного типа, на котором установлены двигатель, движители и соединяющая их трансмиссия. Он отличается простотой конструкции, относительно невысокой стоимостью и возможностью дистанционного управления с сопровождающего судна. Модули могут соединяться между собой для транспортировки укрупнённых лесотранспортных единиц, а их малые масса и габариты позволяют осуществлять погрузку-выгрузку и перевозку с помощью сортиментовоза, оснащённого манипулятором. Это обеспечивает их быстрый возврат к месту отправления леса без холостого хода против течения, что особенно важно в условиях короткой навигации. Таким образом, появляется возможность более активно использовать самый дешёвый водный транспорт лесоматериалов, обеспечивая экономическую доступность древесного сырья из удалённых лесных массивов [2, 3, 4]. Предпосылкой этому является также наличие лесотранспортных единиц и соответствующих технологий, предназначенных для экологически щадящей доставки древесного сырья по средним и малым рекам [2, 4, 5]. Так как модули предназначены только для буксировки лесотранспортных единиц, обладающих большим гидродинамическим сопротивлением, их движители логично проектировать, ориентируясь лишь на этот рабочий режим с целью получения максимально возможной тяги при данной мощности силовой установки. Скорость буксировки лесотранспортных единиц обычно невелика и составляет 4–5 км/ч (классические работы по лесосплаву: Минаев и др., 1991²; Пятакин и др., 1985³), что необходимо для обеспечения достаточной управляемости. При таких малых скоростях целесообразно использовать винты с особо малым шаговым отношением и с наибольшим возможным диаметром. Конструкция модуля в виде катамарана также нетипична для буксировщика и продиктована стремлением к снижению стоимости и обеспечению остойчивости (Войткунский и др.⁴, 1982; Войткунский, 1988⁵). От обычных судов модуль существенно отличается соотношением малого водоизмещения и диаметра

винтов, а также наличием сжатого потока между понтонами. Очень важно должным образом спроектировать движители буксировочного модуля. Общий алгоритм проектирования движителей судов для внутреннего плавания регламентирован классическим руководством (Басин и Степанюк, 1977⁶). Однако буксировочный модуль имеет существенные особенности, которые могут влиять на один из важнейших факторов – гидродинамическое влияние корпуса на условия работы движителей (попутный поток).

Цель исследования – обеспечение достоверности результатов при проектировании движителей буксировочного лесотранспортного модуля посредством более точной оценки гидродинамического влияния плавучего основания устройства на условия работы гребных винтов. *Объект исследования* – система «плавучее основание – движители» буксировочного лесотранспортного модуля. *Предмет исследования* – гидродинамическое влияние корпуса буксировочного модуля на условия работы движителей.

Обзор литературы

В процессе буксировки формируется сложная многокомпонентная система, которая подвержена совместному воздействию многих факторов. Как отмечают Qi K. с соавторами [6], современные исследования в этой области фокусируются на численном моделировании и физическом эксперименте, причём вопросы учёта гидродинамического взаимодействия корпуса и движителя остаются недостаточно проработанными для судов нестандартной компоновки. В связи с тем, что разрабатываемый модуль имеет плавучее основание катамаранного типа, существенный интерес в данном случае представляет работа Пескова И.А. и Посыпанова С.В. [7], в которой приведены результаты гидродинамического исследования катамараноподобного тела. Эти результаты получены посредством основательной теоретической проработки и физического моделирования (масштаб 1:20) с соблюдением подобия по числу Фруда. Данная работа даёт методологию учёта ключевых факторов и позволяет оценить характер и степень влияния каждого из них на выходные величины.

² Минаев А.Н., Беленов И.А., Козленков Н.И. Лесосплавной флот. – М.: Экология, 1991. – 272 с.

³ Пятакин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. – М.: Лесн. пром-сть, 1985. – 336 с.

⁴ Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. – Л.: Судостроение, 1982. – 568 с.

⁵ Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.

⁶ Руководство по расчету и проектированию гребных винтов судов внутреннего плавания / под ред. А.М. Басина, Е.И. Степанюка. – Л.: Транспорт, 1977. – 272 с.

Важный методологический вклад вносит работа Deng R. с соавторами [8], посвящённая совместной оптимизации главных размерений и формы корпуса балкера. Авторы использовали эмпирические методы Холтропа и Меннена (сопротивление), Бейлза (мореходность) и индексы К и Т Номото (управляемость), скорректировав их по данным CFD-расчётов. Введённый комплексный оптимизационный индекс Z , учитывающий стоимость постройки, позволил выбрать новый корпус-прототип. Последующая оптимизация формы по минимуму волнового сопротивления дала дополнительное снижение сопротивления до 1,5%, подтверждённое опытовыми испытаниями. Эта методология коррекции эмпирических формул по данным численного моделирования адаптирована в настоящем исследовании для обоснования расположения движителей. Непосредственно для оценки поля скоростей в диске винта за корпусом катамарана важны результаты Zaghi S. с соавторами [9], которые на основе CFD-моделирования показали, что форма межкорпусного канала существенно влияет на эпюру попутного потока. Audin C. с соавторами [10] и Piaggio B. с соавторами [11, 12] предложили методы расчёта гидродинамических нагрузок на буксировщики с учётом особенностей их обводов, что позволяет уточнить коэффициент засасывания при проектировании движителей. Mauro F. [13] развил подходы к оценке пропульсивных качеств судов внутреннего плавания, включая влияние попутного потока. Применительно к условиям мелководья и стеснённых фарватеров, характерных для малых и средних рек, важные результаты получены в работах Chen M. с соавторами [14] и Huang Y. с соавторами [15], где показано, что учёт попутного потока при проектировании движителей позволяет повысить точность прогнозирования тяговых характеристик на 10–15% по сравнению с использованием стандартных эмпирических формул. Fitriadhy A. и Yasukawa H. [16], а также Zhu H. и Hu C. [17] разработали математические модели, описывающие влияние корпуса на работу движителя в нестационарных режимах буксировки (начало движения, маневрирование). Nan Y. с соавторами [18] исследовали взаимодействие системы «корпус – движитель» при ледовых нагрузках, что актуально для северных регионов. Экспериментальные методы верификации CFD-расчётов поля попутного потока представлены в работах Park S.H. с соавторами [19] и Nam T.K. с соавторами [20]. Фундаментальные подходы к проектированию гребных винтов и оценке их взаимодействия с корпусом изложены в монографиях Carlton J.S. [21] и Molland A.F. с соавторами [22].

Таким образом, анализ современных работ и классических трудов показывает, что для нестандартных схем (катамаран, малое

водоизмещение, большие диаметры винтов) стандартные эмпирические зависимости коэффициента попутного потока могут давать существенные погрешности. В настоящей работе на основе численного эксперимента (SOLIDWORKS Flow Simulation) исследуется поле скоростей в межпонтонном пространстве и за кормой модуля, затем вычисляется фактический коэффициент попутного потока для различных положений винтов. Полученные аппроксимирующие зависимости позволяют уточнить гидродинамическое влияние корпуса катамаранного типа на работу движителей – что является необходимым условием для корректного проектирования гребных винтов буксировочного модуля.

Материалы и методы исследования

Гидродинамическое влияние корпуса судна или, в нашем случае, плавучего основания буксировочного модуля на условия работы движителей осуществляется через так называемый попутный поток. Этот поток возникает у смоченных поверхностей судна при движении его в воде. Его влияние сказывается и за кормой судна на некотором удалении от неё. В результате гребные винты у обычного судна движутся поступательно относительно потока со скоростью несколько меньшей скорости самого судна. Поступательная скорость винтов v_0 и судна v связаны формулой

$$v_0 = v(1 - \varphi), \quad (1)$$

где φ – коэффициент попутного потока.

Величина коэффициента φ зависит от водоизмещения судна V , формы подводной части корпуса, характеризуемой коэффициентом полноты водоизмещения δ , а также от диаметра винтов D и их расположения относительно корпуса. При расчётах движителей обычных судов для вычисления коэффициента φ как правило используется выражение

$$\varphi = 0,11 + \frac{0,16}{a} \delta^a \sqrt[3]{\frac{V}{D}}. \quad (2)$$

При числах Фруда [18], превышающих 0,2, из полученной величины вычитается небольшая поправка, зависящая от коэффициента полноты водоизмещения, длины корпуса судна и скорости движения. При скоростях буксировки лесотранспортных единиц и геометрических характеристиках плавучего основания буксировочного модуля числа Фруда меньше указанного значения. В связи с этим нет необходимости более подробно рассматривать указанную поправку.

Величина a характеризует расположение винтов. При установке винта в диаметральной плоскости судна она равна 1, для бортовых движителей 2. Учитывая, что коэффициент δ меньше единицы, при $a = 2$, то есть для бортовых винтов коэффициент φ в соответствии

с выражением (2) меньше, чем для винта, расположенного в диаметральной плоскости. Поскольку движители буксировочного модуля смещены относительно диаметральных плоскостей понтонов плавучего основания их можно считать бортовыми. В результате предварительных расчётов установили, что при заданных геометрических характеристиках плавучего основания буксировочного модуля и при диапазоне диаметров винтов 0,5-1,0 м коэффициент φ принимает значения 0,14-0,15. При таких величинах указанного коэффициента влияние попутного потока на параметры винтов довольно существенно. Как было отмечено водоизмещение плавучего основания буксировочного модуля по сравнению с обычными лесосплавными судами невелико. Это объясняется тем, что оно рассчитано в основном на нагрузку от двигателя и ёмкостей с топливом. Диаметр винтов модуля не столь существенно отличается от соответствующих диаметров указанных судов в связи с стремлением к получению максимально возможной полезной тяги. То есть у обычных судов отношение водоизмещения к диаметру винтов больше, чем у буксировочного модуля и согласно выражению (2) они имеют большие значения φ . Влияние попутного потока на параметры движителей у этих судов ещё более существенно. Формула (2) эмпирическая, то есть справедлива в тех диапазонах варьируемых факторов и для тех условий, для которых она получена. Поскольку соотношение водоизмещения и диаметра винтов у буксировочного модуля нетипично для обычных судов правомерность использования формулы (2) в данном случае уже ставится под сомнение. Кроме того, у обычного судна даже бортовые винты не выходят за поперечный габарит корпуса. У буксировочного модуля с плавучим основанием катамаранного типа винт или винты могут быть существенно смещены относительно поперечного габарита понтонов и соответственно менее подвержены влиянию попутного потока, прилегающего к этим понтонам. Это ещё в большей степени ставит под сомнение справедливость формулы (2) применительно к рассматриваемому модулю. Следует ожидать, что влияние попутного потока на движители буксировочного модуля будет гораздо слабее. Также следует иметь в виду, что поток входя в пространство между понтонами после прохождения носовой части испытывает некоторое сжатие, что предполагает увеличение его скорости.

Для оценки соотношения между скоростями движения относительно воды модуля и его движителей проведено соответствующее исследование. Проведение экспериментов на физических моделях по исследованию поля скоростей в зоне установки движителей буксировочного модуля требует довольно дорогостоящего оборудования и весьма трудоёмко.

208

В ещё большей степени это относится к экспериментальным исследованиям в натурных условиях. В связи с этим обратились к методам численного моделирования (CFD), к вычислительной гидродинамике, которые интенсивно развиваются в настоящее время и позволяют получать результаты с достаточно высокой точностью. В основу указанного моделирования заложен метод конечных элементов (FEA). При исследованиях использовали программу SOLIDWORKS Flow Simulation.

Приступая к исследованиям, создали 3D модель плавучего основания буксировочного модуля (рис. 1) с размерами в плане 6,5х2,35 м. Диаметр понтонов 0,6 м, расчётная осадка 0,4 м. При заданных размерах и предполагаемых скоростях движения как было отмечено число Фруда не превышает 0,2. Принято считать, что в таких случаях скорость движения не влияет на величину коэффициента попутного потока. Иначе можно сказать, что соотношение между скоростью движения модуля и скоростями потока в области установки движителей не зависит от величины первой из них в рассматриваемом диапазоне. Поэтому исследование проводили при постоянной скорости движения модуля в процессе буксировки равной 1,25 м/с, то есть 4,5 км/ч. Пояснения по этой величине приведены выше.

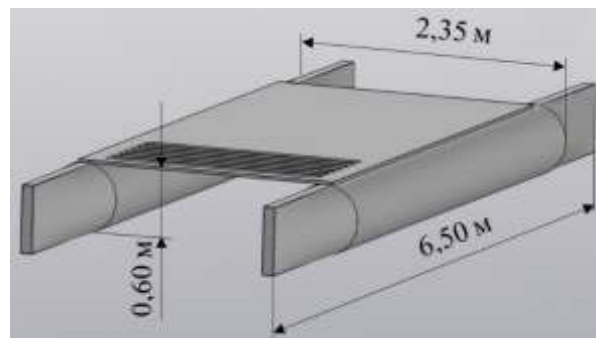


Рисунок 1. 3D модель плавучего основания буксировочного модуля

Figure 1. 3D model of the floating base of the towing module

При численном моделировании расчётная сетка строилась на основе гексаэдрических элементов с призматическими слоями в пристеночной области. Для задачи был задан шестой уровень разрешения (при максимально возможном 7). Расчётная сетка генерировалась программой в соответствии с заданным уровнем. Количество ячеек составило 1 512 128, что обеспечило детальное разрешение поля скоростей. Для повышения точности в зонах с более высокими градиентами скоростей (межпontonное пространство, кормовая оконечность)

Лесотехнический журнал 2/2026

осуществлялась адаптация сетки с уровнем дробления 2 и доведением числа ячеек до 5 950 000. Значение u^+ в пристеночных ячейках поддерживалось программой менее 30, что соответствует рекомендациям для модели турбулентности k-ε с пристеночными функциями.

Задавались следующие граничные условия. На входе в расчётную область (Xmin) скорость потока 1,25 м/с, среднее статическое давление 102 кПа. На выходе (Xmax) – среднее статическое давление 102 кПа. Границы расчётной области при Ymin, Ymax, Zmin, Zmax свободные с возможностью втекания-вытекания. Свободная поверхность жидкости моделировалась с использованием модели двухфазной среды «вода–воздух» с гравитацией (Y компонента – 9,81 м/с²).

Шероховатость поверхности 50 мкм. Тип течения – ламинарное и турбулентное, модель турбулентности – k-ε со стандартными параметрами.

Результаты численных экспериментов визуализировали посредством линий одинаковых скоростей - изотах в продольных сечениях. Такие сечения строили в диаметральной плоскости плавучего основания, между этой плоскостью и внутренними образующими понтонов, у этих образующих, в диаметральных плоскостях понтонов и у внешних образующих понтонов. Изотахи строились по задаваемым сечениям средствами SOLIDWORKS Flow Simulation автоматически. Шаг между изотахами устанавливался программой в зависимости от диапазона получаемых скоростей. Фрагмент одного из таких сечений в качестве примера приведен на рисунке 2.

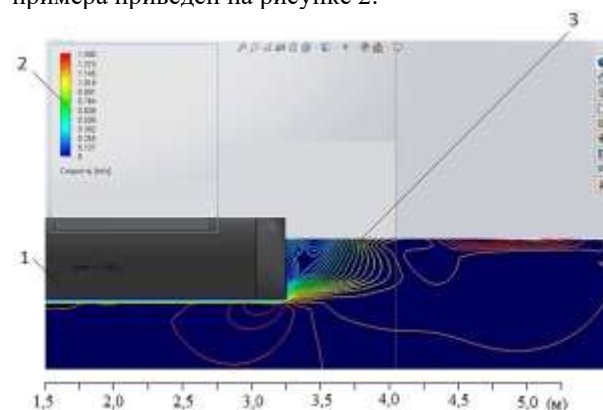


Рисунок 2. Фрагмент продольного сечения в диаметральной плоскости понтона: 1 - кормовая часть понтона плавучего основания; 2 - шкала скоростей; 3 – изотахи

Figure 2. Fragment of a longitudinal section in the centerline plane of the pontoon: 1 - aft part of the floating base pontoon; 2 - speed scale; 3 – isotachs

По изотахам для каждого из упомянутых продольных сечений заполнили таблицы, в которые

занесли скорости на различных удалениях x от среднего поперечного сечения плавучего основания или иначе от миделя и при различных значениях координаты z . Ось z в данном случае направлена вертикально вниз. Одна из таких таблиц (табл. 1) для примера приведена ниже.

Структура таблиц для всех продольных сечений одинакова. При этом сочетание заполненных и незаполненных ячеек различно, что объясняется особенностями прохождения изотах в разных сечениях. Совокупность данных по всем сечениям даёт достаточно полное представление о поле скоростей в рассматриваемой зоне.

По данным полученных таблиц были построены графики зависимостей скоростей от x и z для всех упомянутых продольных сечений. В качестве примера такие графики представлены на рисунке 3 для диаметральной плоскости плавучего основания модуля.

На рисунке 3 по ряду величин z графики не представлены в связи с их выраженной фрагментарностью, объясняющейся наличием большего количества пустых ячеек в соответствующей таблице. Эти фрагментированные графики сделали бы рисунок менее наглядным. Характер зависимостей у приведённых и не приведённых графиков аналогичен при некоторых количественных различиях.

Таблица 1
Данные о скоростях потока в
диаметральной плоскости плавучего основания
Table 1
Data on flow velocities in the centerline of the
floating base

Удаление от миделя x , м Distance from midship x , m	Скорости (м/с) при z 0,280-0,850 м Velocity (m/s) at z 0.280-0.850 m				
	0,280	0,300	0,450	0,665	0,850
2,80	1,350	-	1,362	-	1,328
2,85	-	-	-	1,346	-
3,00	-	-	1,374	1,346	1,326
3,10	1,323	-	1,374	1,343	-
3,15	-	-	-	-	1,317
3,25	-	-	-	1,330	-
3,30	1,291	-	1,361	-	1,304
3,60	-	1,258	1,297	1,275	1,266
3,80	-	-	-	1,241	-
3,90	-	1,187	1,224	-	-
4,00	-	-	-	1,215	1,222
4,20	-	1,160	1,185	1,200	1,209
4,40	-	1,167	1,177	1,191	1,201
4,50	-	-	-	1,189	-

4,60	-	1,174	1,172	1,185	1,196
4,75	-	-	-	1,183	-
4,80	-	-	-	-	1,193
4,90	-	1,171	1,167	1,181	-

Учитывая, что кормовые окончания понтонов плавучего основания удалены от миделя на 3,25 м, отмечаем, что между понтонами скорость потока несколько больше расчётной скорости буксировки равной 1,25 м/с (рис. 3). До выхода из межпонтонного пространства изменения скорости потока незначительны. Это подтверждает изложенные выше предположения об увеличении скорости в результате стеснения потока между понтонами и о более слабом, чем у обычных судов влиянии попутного потока. В данном случае воздействие первого фактора более существенно.

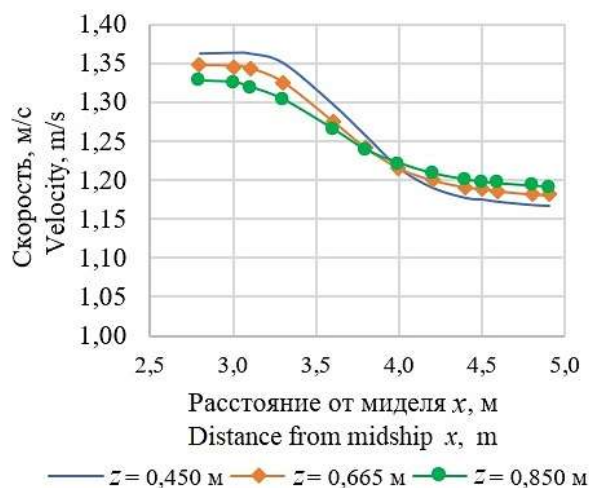


Рисунок 3. Графики зависимостей скоростей в диаметральной плоскости плавучего основания модуля от расстояний, отсчитываемых от миделя x , для различных z

Figure 3. Graphs of the dependence of the speeds in the center plane of the floating base of the module on the distances measured from the midsection x , for different z

После выхода из межпонтонного пространства поток несколько расширяется и его скорость начинает снижаться (рис. 3), при этом некоторое воздействие попутного потока продолжается. Более интенсивное снижение скорости наблюдается на начальном участке за кормой плавучего основания. Примерно через полметра от кормы скорость потока становится равной 1,25 м/с. Далее следует участок более постепенного снижения скорости и её стабилизации. Очевидно, что на большем удалении, величина которого в рассматриваемом случае не имеет практического значения, перестаёт сказываться

влияние и попутного потока. Скорость движения воды относительно буксировочного модуля возвращается к величине близкой 1,25 м/с. Подобный анализ выполнен по всем упомянутым продольным сечениям и всем рассмотренным z . Его результаты аналогичные при некоторых количественных отличиях. Из изложенной информации следует, что гидродинамическое влияние плавучего основания буксировочного лесотранспортного модуля на работу движителей существенно отличается от соответствующего влияния у обычных судов. Формула (2) в рассматриваемом случае даёт существенные погрешности. Для более корректной оценки упомянутого влияния выполнены следующие действия.

По данным численного эксперимента заполнили таблицы скоростей для девяти поперечных сечений потока, удалённых от миделя на 2,8, 3,0, 3,1, 3,3, 3,6, 4,2, 4,4, 4,6, 4,9 м. Одна из этих таблиц (табл. 2) для примера приведена ниже.

Таблица 2

Данные о скоростях потока в поперечном сечении, удалённом от миделя на 4,2 м

Table 2

Data on flow velocities in the cross-section 4.2 m from the midship section

Координата z , м Coordinate z , m	Скорости (м/с) на удалении от диаметральной плоскости на y 0-1,270 м Velocity (m/s) at a distance from the centerline at y 0-1.270 m				
	0	0,280	0,560	0,911	1,270
0,300	1,160	1,165	1,165	1,177	1,192
0,450	1,185	1,183	1,170	1,139	1,177
0,665	1,200	1,196	1,187	1,183	1,196
0,850	1,209	1,207	1,202	1,202	1,209

Отметим, что и в данном случае в ряде таблиц не все ячейки были заполнены по ранее указанной причине.

Используя данные этих таблиц с помощью программы IBM SPSS Statistics 23 [20] получили для каждого из указанных сечений уравнения регрессии, приведённые ниже в соответствующей последовательности, начиная с сечения, удалённого от миделя на 2,8 м.

$$v_1 = 1,343 + 0,070z + 0,033y - 0,104z^2 - 0,0341y^2 + 0,0284yz; \quad (3)$$

$$v_1 = 1,287 + 0,298z + 0,268y - 0,310z^2 - 0,0626y^2 - 0,180yz; \quad (4)$$

$$v_1 = 1,092 + 1,104z + 0,053y - 1,086z^2 - 0,0141y^2 + 0,0296yz; \quad (5)$$

$$v_1 = 1,042 + 1,173z + 0,0856y - 0,0139y^2 - 0,080yz; \quad (6)$$

$$v_1 = 1,327 - 0,161z - 0,307y + 0,143z^2 + 0,147y^2 + 0,103yz; \quad (7)$$

$$v_1 = 1,168 - 0,0144z - 0,021y + 0,0871z^2 + 0,0299y^2 - 0,0306yz; \quad (8)$$

$$v_1 = 1,175 - 0,0462z + 0,0713y + 0,093z^2 - 0,00326y^2 - 0,0803yz; \quad (9)$$

$$v_1 = 1,197 - 0,114z + 0,0791y + 0,129z^2 - 0,0164y^2 - 0,0591yz; \quad (10)$$

$$v_1 = 1,254 - 0,401z + 0,060y + 0,434z^2 - 0,0108y^2 - 0,0532yz; \quad (11),$$

где v_1 - скорость в заданной точке поперечного сечения, м/с.

Сравнение результатов, полученных при проведении численного эксперимента, с соответствующими результатами, вычисленными по приведённым уравнениям регрессии, в большинстве случаев показало расхождение не более 1-2%, в редких случаях около 3%. Отчасти это объясняется относительно небольшой амплитудой изменения результатов в пределах поперечного сечения. Наличие этих уравнений регрессии позволяет достаточно точно вычислять скорости в любой из точек рассматриваемых поперечных сечений.

Далее в приложении Microsoft Excel был реализован разработанный авторами алгоритм определения скоростей в точках поперечных сечений, в круглых контурах предполагаемого расположения гребных винтов. При расчётах и использовались полученные уравнения регрессии (3)-(11). Вычисления выполнялись для случаев расположения одного винта в диаметральной плоскости плавучего основания и двух винтов, расположенных симметрично относительно указанной плоскости. Скорости вычислялись с шагом 0,01 м по горизонтали и по высоте. Для установления принадлежности конкретной точки к кругу заданного радиуса вычислялась сумма квадратов расстояний от неё до вертикальной и горизонтальной осей круга. Если эта сумма оказывалась меньше квадрата радиуса или равна ему, то вычислялась скорость, в противном случае её вычисление не выполнялось. В целом на один круг, соответствующий месту расположения винта, получалось более 2300 равномерно распределённых точек. За скорость v_0 в зоне расположения винта принимали среднее значение скоростей v_1 , вычисленных по указанным точкам. Результаты расчётов скоростей v_0 приведены в таблице 3.

Таблица 3

Средние скорости v_0 по поперечным сечениям в зонах одного и двух винтов, м/с

Table 3

Average velocities v_0 across cross sections in the zones of one and two propellers, m/s

Расстояние сечения от миделя x , м Distance of the section from midship x , m	1 винт 1 propeller	2 винта 2 propellers
2,8	1,352	1,358
3,0	1,365	1,393
3,1	1,356	1,368
3,3	1,365	1,371
3,6	1,259	1,226
4,2	1,186	1,181
4,4	1,183	1,188
4,6	1,181	1,188
4,9	1,178	1,182

По полученным значениям v_0 для каждого поперечного сечения находили величины коэффициента φ для случаев использования одного и двух винтов. При этом использовали выражение, полученное из формулы (1).

$$\varphi = 1 - \frac{v_0}{v}. \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

В данном случае называть величину φ коэффициентом попутного потока не совсем правильно, поскольку в действительности с её помощью помимо влияния попутного потока учитывается влияние сжатия потока между понтонами. Причём влияние второго фактора на определённом участке в данном случае более существенно. В связи с этим решили далее называть эту величину коэффициентом перехода к скорости поступательного перемещения движителей. Отметим также, что в межпontonном пространстве этот коэффициент принимает отрицательные значения поскольку скорость потока там больше скорости движения буксировочного модуля, в связи с тем, что фактор сжатия потока там более значим, чем фактор попутного потока. За кормой буксировочного модуля значимость факторов меняется на противоположную и коэффициент φ становится положительным. С удалением от кормы его величина возрастает.

Согласно полученным данным наиболее благоприятный скоростной режим для работы движителей будет иметь место при их установке в межпontonном пространстве или непосредственно при выходе из него в кормовой зоне плавучего

основания буксировочного модуля. Значение коэффициента φ при расчётах в этом случае следует принимать $-0,08 \dots -0,09$ при установке одного винта и $-0,09 \dots -0,11$ при установке двух. При отрицательных значениях коэффициента φ , то есть при увеличенной по сравнению с забортной набегающей скорости на движители, увеличивается относительная поступь винтов и соответственно согласно диаграммам Папмеля увеличивается их КПД. На расстоянии от кормы $0,05 \dots 0,10$ м начинается увеличение значения коэффициента φ . Это наглядно демонстрирует графики, приведённые на рисунке 4. Следует иметь в виду, что корма плавучего основания заканчивается на расстоянии $3,25$ м от миделя.

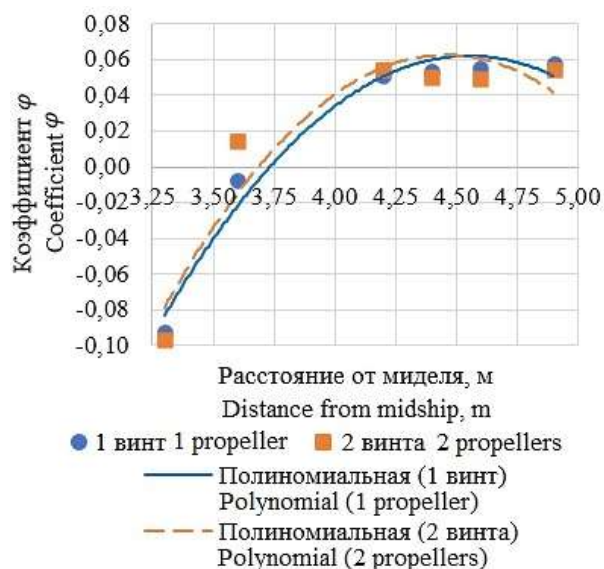


Рисунок 4. Графики зависимости коэффициента φ от расстояния от миделя
Figure 4. Graphs of the dependence of the coefficient φ on the distance from the midship

По графикам видно (рис. 4), что при теоретически возможном расположении движителей на расстоянии $4,5$ м от миделя коэффициент φ у данного плавучего основания достигает максимального значения $0,06$. Напомним, что расчёт по формуле (2), предназначенной для обычных судов, при том же водоизмещении и диаметре бортовых винтов даёт результат $\varphi = 0,14 \dots 0,15$. То есть даже при сравнении с максимумом значения коэффициента φ различаются в $2,5$ раза. Соответствующие данные для катамаранов при литературном поиске не обнаружены.

Для возможности расчёта коэффициента φ при установке винтов за кормой буксировочного модуля получены соответствующие графикам

аппроксимирующие зависимости. Для случая установки одного винта зависимость имеет вид

$$\varphi = -0,0926x^2 + 0,843x - 1,856, \quad (13)$$

$$R^2 = 0,98;$$

при установке двух винтов

$$\varphi = -0,103x^2 + 0,926x - 2,011, \quad (14)$$

$$R^2 = 0,93.$$

Разумеется, при выборе места установки движителей наряду со скоростным режимом следует учитывать и другие факторы. В частности, если предполагается использование винторулевых колонок, то установка их между понтонами может быть несколько проблематичной поскольку при их повороте на пути потока, отбрасываемого винтами, могут оказаться кормовые части понтонов. Поэтому такие колонки целесообразно устанавливать в створе, проходящем через кормовые окончания понтонов. Кроме того, в межпontonном пространстве можно установить либо один винт достаточно большого диаметра, либо два диаметром не более $0,5$ м, поскольку поперечный габарит буксировочного модуля лимитирован условиями перевозки. При этом расчёты показывают, что при использовании силовой установки мощностью 125 кВт и более при необходимости получения наибольшей тяги и эффективном использовании мощности двигателя при условии достаточных глубин на маршрутах целесообразно применение двух винтов с диаметрами, превышающими $0,5$ м. В таких случаях створ расположения винтов должен быть вынесен за кормовые окончания понтонов в непосредственной близости от них. В любом случае применение для рассматриваемого буксировочного модуля плавучего основания катамаранного типа наряду с другими достоинствами, указанными в введении, обеспечивает более благоприятный скоростной режим для работы движителей, чем у обычных буксирных судов.

Заключение

В результате теоретического анализа сделан вывод о том, что формула, обычно применяемая для определения коэффициента попутного потока, с помощью которого оценивается гидродинамическое влияние корпуса судна на скоростной режим, в котором работают движители, для рассматриваемого буксировочного лесотранспортного модуля может давать существенные погрешности. При этом отмечены три основных особенности буксировочного модуля, позволивших сделать такой вывод. Первая особенность - нетипичное для обычных судов соотношение водоизмещения плавучего основания и диаметра винтов, что важно для эмпирической формулы. Вторая особенность - наличие сжатия водного потока между понтонами плавучего основания, что может влиять не менее существенно на скоростной режим в месте расположения движителей, чем наличие попутного потока. Третья

особенность - винты размещаются за пределами поперечного габарита понтонов в то время, как у обычных судов даже бортовые винты не выходят за поперечный габарит корпуса, что предполагает в рассматриваемом случае более слабое влияние попутного потока.

В ходе проведения численных экспериментов подтверждена правильность выводов, сделанных на этапе теоретического исследования. При анализе полученных данных по характерным продольным сечениям потока установлено, что скорость в межпontonном пространстве буксировочного модуля выше скорости его движения, что объясняется фактором стеснения потока, который на данном участке более значим, чем фактор попутного потока. За кормой буксировочного модуля при выходе потока из межпontonного пространства значимость факторов меняется. Скорость потока уменьшается и постепенно становится меньше скорости движения модуля. При этом соответствующий коэффициент, учитывающий снижение скорости, остаётся существенно меньше значений, получаемых по обычно используемой формуле. Это свидетельствует о более благоприятном скоростном режиме для работы движителей при предлагаемом техническом решении.

Для установления более достоверных сведений о величине указанного коэффициента с использованием данных численного эксперимента по нескольким поперечным створам получены для каждого из них аппроксимирующие зависимости (3)-(11) скорости от координат. Для каждого створа с использованием указанных зависимостей по специально разработанному алгоритму вычислены средние скорости в пределах круглых контуров, соответствующих расположению одного винта в диаметральной плоскости и двух винтов симметричных относительно её. По этим скоростям установлены значения так называемого коэффициента попутного потока, которому в данном случае присвоено более соответствующее название коэффициента перехода к скорости поступательного перемещения движителей. Значение этого коэффициента при размещении движителей в межпontonном пространстве следует принимать – 0,08...- 0,09 при установке одного винта и - 0,09...- 0,11 при установке двух. Для определения значений указанного коэффициента в случае установки винтов за кормой буксировочного модуля получены соответствующие аппроксимирующие зависимости (13), (14).

Наиболее благоприятный скоростной режим для работы движителей будет иметь место при их установке в межпontonном пространстве на расстоянии до полуметра от кормовой оконечности понтонов. В межпontonном пространстве данного модуля можно установить либо один винт

достаточно большого диаметра, либо два диаметром не более 0,5 м. При установке двух движителей большего диаметра створ расположения винтов должен быть вынесен на минимально возможное расстояние за кормовые окончания понтонов. Если предполагается использование одной винторулевой колонки или двух с диаметром движителей до 0,5 м, их целесообразно устанавливать в крайнем кормовом створе или в непосредственной близости от него со стороны носовой части так, чтобы при их повороте на пути потока, отбрасываемого винтами, не оказались кормовые части понтонов.

1. Посыпанов С.В., Калитин Н.С. Экспериментальное исследование эффективности вариантов герметизации FDM-моделей буксировочных устройств для транспортировки малогабаритных лесотранспортных единиц // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2026. - № 4. - С. 36-39. - DOI: 10.31044/1684-2561-2026-0-4-36-39.
2. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Использование плоских сплочных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. - 2022. - № 1. - С. 128-142. - DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
3. Посыпанов С.В., Карпачев С.П., Клевеко В.И. Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов // Известия вузов. Лесной журнал. - 2025. - № 1. - С. 164-176. - DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-164-176.
4. Посыпанов С.В., Карпачёв С.П. Силовое выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплочных единиц при формировании в воде // Известия вузов. Лесной журнал. - 2026. - № 1. - С. 161-173. - DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-161-173.
5. Vasiliev V.V., Afonichev D.N. Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплочных единицах по принципу плот (линейка) – плот. Resources and Technology. 2021; 18 (2): 48-78. - DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
6. Qi K., Zhang J., Zhang L., Zhang J., Gan R. A Review of Research Progress on Cables and Towed Objects of the Ocean Engineering Towing System. Journal of Marine Science and Engineering. 2025; 13 (2): 257. - DOI: 10.3390/jmse13020257.
7. Песков И.А., Посыпанов С.В. Исследование равномерного движения в воде устройства для формирования двухъярусных пакетных сплочных единиц // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. - 2020. - № 4 (48). - С. 41-49. - DOI: 10.25686/2306-2827.2020.4.41.
8. Deng R., Wang S., Hu Y., Wang Y., Wu T. The Effect of Hull Form Parameters on the Hydrodynamic Performance of a Bulk Carrier. Journal of Marine Science and Engineering. 2021; 9 (4): 373. - DOI: 10.3390/jmse9040373.
9. Zaghi S., Broglia R., Di Mascio A. Analysis of the wake field in the propeller plane of a twin-hull vessel using CFD. Applied Ocean Research. 2025; 145: 103920. - DOI: 10.1016/j.apor.2025.103920.
10. Aydın Ç., Ünal U., Karabulut U., Sariöz K. Practical computational procedures for predicting steering and braking forces of escort tugs. Ocean Engineering. 2018; 166: 159-171. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.058.
11. Piaggio B., Villa D., Viviani M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics. Applied Ocean Research. 2020; 97: 102075. - DOI: 10.1016/j.apor.2020.102075.
12. Piaggio B., Villa D., Viviani M., Figari M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics – Part II: The skeg effect. Applied Ocean Research. 2020; 100: 102199. - DOI: 10.1016/j.apor.2020.102199.
13. Mauro F. A flexible method for the initial prediction of tugs escort capability. Ocean Engineering. 2022; 246: 110585. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110585.
14. Chen M., Chen Y., Li T., Tang Y., Ye J., Zhou H., Ouyang M., Zhang X., Shi W., Sun X. Analysis of the wet-towing operation of a semi-submersible floating wind turbine using a single tugboat. Ocean Engineering. 2024; 299: 117354. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117354.
15. Huang Y., He Y., Liu Y., Qiu M. Study of the wet-towing transportation of an FPSO with elastomeric-supporting topside modules. Ocean Engineering. 2024; 293: 116602. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116602.
16. Fitriadhy A., Yasukawa H. Course stability of a ship towing system in wind. Ocean Engineering. 2013; 64: 135-145. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.02.004.
17. Zhu H., Hu C. A unified seakeeping and maneuvering analysis of multiple linked towing system with triangular bodies. Ocean Engineering. 2021; 222: 108577. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108577.
18. Han Y., Zhu X., Zhou L. Numerical simulation of multi-tug towing of a gravity-based structure in broken sea ice. Ocean Engineering. 2022; 261: 112070. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112070.
19. Park S.H., Lee S.J., Lee S. Experimental investigation of towing- and course-stability of a FPSO towed by a tugboat with lateral motion. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2021; 13: 12-23. - DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.12.003.
20. Nam T.K., Jung C.H., Kim J.M., Choi H. A Study on the Calculation of Towing Force for the Disabled Ship and Its Experiments. Journal of Navigation and Port Research. 2014; 38 (5): 463-470. - DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.5.463.
21. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. 4th ed. // Butterworth-Heinemann. - 2019. - 586 p. - ISBN: 978-0-08-100366-4.

22. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship Resistance and Propulsion. 2nd ed. // Cambridge University Press. – 2017. – 632 p. – ISBN: 978-1-107-14129-8.

References

1. Posypanov S.V., Kalitin N.S. Eksperimental'noe issledovanie effektivnosti variantov germetizatsii FDM-modelej buksirovochnykh ustroystv dlya transportirovki malogabaritnykh lesotransportnykh edinits. [Experimental study of the effectiveness of sealing options of FDM models of towing devices for transporting small-sized timber transport units]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair. Restoration. Modernization*. 2026;4:36-39. (In Russ.). DOI: 10.31044/1684-2561-2026-0-4-36-39.
2. Vasiliev V.V., Afonichev D.N. Ispolzovanie ploskikh splotochnykh edinit na pervonachalnom splave lesomaterialov. [The use of flat rafting units for the primary timber rafting]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2022;1:128-142. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
3. Posypanov S.V., Karpachev S.P., Kleveko V.I. Raschetnye usiliya pri tortsevanii lesosplavnykh puchkov v usloviyakh beregovykh skladov. [Calculation of forces during trimming of timber rafts at coastal warehouses]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2025;1:164-176. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-164-176.
4. Posypanov S.V., Karpachyov S.P. Silovoe vyravnivanie tortsov dvukhyarusnykh paketnykh splotochnykh edinit pri formirovani v vode. [Strength alignment of the ends of two-tier packaged raft units when forming in water]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2026;1:161-173. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-161-173.
5. Vasiliev V.V., Afonichev D.N. Obosnovanie parametrov transportno-tehnologicheskoy skhemy postavki drevesiny v ploskikh splotochnykh edinitakh po printsipu plot (lineyka) – plot. [Justification of the parameters of the transport and technological scheme of wood supply in flat raft units according to the raft (section lines) – raft principle]. *Resources and Technology*. 2021;18(2):48-78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
6. Qi K., Zhang J., Zhang L., Zhang J., Gan R. A Review of Research Progress on Cables and Towed Objects of the Ocean Engineering Towing System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(2):257. DOI: 10.3390/jmse13020257.
7. Peskov I.A., Posypanov S.V. Issledovanie ravnomernogo dvizheniya v vode ustroystva dlya formirovaniya dvukhyarusnykh paketnykh splotochnykh edinit. [The study of even movement in water of the device to make the packaged bilevel rafting units]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie = Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2020;4(48):41-49. (In Russ.). DOI: 10.25686/2306-2827.2020.4.41.
8. Deng R., Wang S., Hu Y., Wang Y., Wu T. The Effect of Hull Form Parameters on the Hydrodynamic Performance of a Bulk Carrier. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(4):373. DOI: 10.3390/jmse9040373.
9. Zaghi S., Broglia R., Di Mascio A. Analysis of the wake field in the propeller plane of a twin-hull vessel using CFD. *Applied Ocean Research*. 2025;145:103920. DOI: 10.1016/j.apor.2025.103920.
10. Aydın Ç., Ünal U., Karabulut U., Sarıöz K. Practical computational procedures for predicting steering and braking forces of escort tugs. *Ocean Engineering*. 2018;166:159-171. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.058.
11. Piaggio B., Villa D., Viviani M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics. *Applied Ocean Research*. 2020;97:102075. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102075.
12. Piaggio B., Villa D., Viviani M., Figari M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics – Part II: The skeg effect. *Applied Ocean Research*. 2020;100:102199. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102199.
13. Mauro F. A flexible method for the initial prediction of tugs escort capability. *Ocean Engineering*. 2022;246:110585. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110585.
14. Chen M., Chen Y., Li T., Tang Y., Ye J., Zhou H., Ouyang M., Zhang X., Shi W., Sun X. Analysis of the wet-towing operation of a semi-submersible floating wind turbine using a single tugboat. *Ocean Engineering*. 2024;299:117354. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117354.
15. Huang Y., He Y., Liu Y., Qiu M. Study of the wet-towing transportation of an FPSO with elastomeric-supporting topside modules. *Ocean Engineering*. 2024;293:116602. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116602.
16. Fitriadhy A., Yasukawa H. Course stability of a ship towing system in wind. *Ocean Engineering*. 2013;64:135-145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.02.004.
17. Zhu H., Hu C. A unified seakeeping and maneuvering analysis of multiple linked towing system with triangular bodies. *Ocean Engineering*. 2021;222:108577. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108577.
18. Han Y., Zhu X., Zhou L. Numerical simulation of multi-tug towing of a gravity-based structure in broken sea ice. *Ocean Engineering*. 2022;261:112070. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112070.

19. Park S.H., Lee S.J., Lee S. Experimental investigation of towing- and course-stability of a FPSO towed by a tug-boat with lateral motion. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2021;13:12-23. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.12.003.
20. Nam T.K., Jung C.H., Kim J.M., Choi H. A Study on the Calculation of Towing Force for the Disabled Ship and Its Experiments. *Journal of Navigation and Port Research*. 2014;38(5):463-470. DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.5.463.
21. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. 4th ed. *Butterworth-Heinemann*. 2019. 586 p. ISBN: 978-0-08-100366-4.
22. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship Resistance and Propulsion. 2nd ed. *Cambridge University Press*. 2017. 632 p. ISBN: 978-1-107-14129-8.

Сведения об авторах

Посыпанов Сергей Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геодезии и земельного кадастра, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: s.posypanov@narfu.ru, ResearcherID: ABF-6542-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>. SPIN-код 8592-0690.

Калитин Никита Сергеевич – аспирант ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: kalitin.n@edu.narfu.ru.

Information about the authors

Sergey V. Posypanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy and Land Cadastre of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: s.posypanov@narfu.ru, ResearcherID: ABF-6542-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>. SPIN-code: 8592-0690.

Nikita S. Kalitin – Postgraduate student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: kalitin.n@edu.narfu.ru.

Обоснование параметров и разработка конструкций навесных трелёвочных тележек для тракторов общего назначения

Владимир В. Сиваков¹, sv@bgtu.ru,  0000-0002-0175-9030

Анатолий Н. Заикин¹, zaikin.anatolij@yandex.ru,  0000-0002-1831-6893

Владимир А. Зеликов² , zelikov-vrn@mail.ru, 0000-0003-2317-9413

¹ ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Повышение производительности труда при комплексной механизации лесозаготовок сдерживается экологическим ущербом от перемещения тяжелой техники: удельное давление на почву достигает 0,08–0,12 МПа, глубина колеи – 20–30 см, повреждение корневой системы оставляемых деревьев – до 60–70%. Снижение вредного воздействия возможно за счёт использования тракторов общего назначения с навесными приспособлениями. На основании анализа существующих устройств (трелёвочных лебёдок ЛТН 50, клещевых захватов ЗТ 140 М, УТУ 2 «ПАУК М», грейферов HRZ и Uniforest) установлено, что наиболее эффективным является навесная трелёвочная тележка с захватом, работающая в полуподвешенном режиме. Авторами предложены два патентованных варианта конструкции [24]. Основные параметры: грузоподъёмность до 5 т (объём пачки до 6 плотных м³), масса тележки 380 кг, усилие зажима клещевин не менее 35 кН, рабочее давление в гидросистеме 16–20 МПа, время цикла захват/сброс 5–8 с. Агрегатирование с трактором (например, МТЗ-320) – через трёхточечную навеску категории 2 (ГОСТ 3480–76). При рабочем ходе тележка перекачивается по грунту на пневмоколёсах 6,50–10, что разгружает заднюю ось трактора на 35–40%, снижает тяговое сопротивление на 25–30% и удельное давление на почву до 0,02–0,03 МПа (в 3–4 раза меньше, чем при чокерной трелёвке), глубину колеи – до 5–8 см. При холостом ходе тележка поднимается на клиренс не менее 400 мм, повышая манёвренность трактора (радиус поворота сокращается на 20–25%) и снижая износ ходовой части. Тяговый расчёт для трактора МТЗ-320 (мощность 26,48 кВт, $\eta=0,85$) показал касательную силу тяги 16,55 кН, допустимый вес пачки 30,8 кН, объём пачки 2,8–3,9 м³ в зависимости от длины сортимента (4,5 м). Сменная производительность при расстоянии трелёвки 100 м и объёме хлыста 0,38 м³ составляет 97,7–104,8 м³/смену в зависимости от скоростного режима (холостой ход 1,81–2,49 м/с, гружёный 1,02–1,36 м/с). Разработанные 3D-модели и кинематические схемы подтверждают адаптацию тележки к неровностям рельефа (угловые перемещения до $\pm 15^\circ$) и высокую ремонтпригодность в полевых условиях.

Ключевые слова: лесозаготовки, трелёвка, трелёвочные приспособления, трелёвочная тележка, моделирование, экологичность лесопользования

Финансирование: Исследование выполнено без привлечения дополнительного финансирования

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

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сиваков, В. В. Обоснование параметров и разработка конструкций навесных трелёвочных тележек для тракторов общего назначения / В. В. Сиваков, А. Н. Заикин, В. А. Зеликов // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 217–233. – Библиогр.: с. 230–233 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/14>.

Поступила 25.01.2026. **Пересмотрена** 20.02.2026. **Принята** 20.05.2026. **Опубликована онлайн** 26.06.2026

Justification of parameters and development of designs for mounted skidding carts for general-purpose tractors

Vladimir V. Sivakov¹, sv@bgtu.ru, ☎0000-0002-0175-9030

Anatolii N. Zaikin¹, zaikin.anatolij@yandex.ru, ☎0000-0002-1831-6893

Vladimir A. Zelikov² ✉, zelikov-vrn@mail.ru, 0000-0003-2317-9413

¹ Bryansk State University of Engineering and Technology, Stanke Dimitrova Ave., 3, Bryansk, 241037, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Increasing labour productivity in mechanised logging is constrained by environmental damage from heavy machinery: specific ground pressure reaches 0.08–0.12 MPa, rut depth – 20–30 cm, root system damage to remaining trees – up to 60–70%. Reducing the negative impact is possible by using general-purpose tractors with mounted attachments. Based on the analysis of existing devices (LTN 50 skidding winches, ZT 140 M grapple grabs, UTU 2 “PAUK M”, HRZ and Uniforest grapples), it was found that the most effective is a mounted skidding trolley with a grapple operating in semi-suspended mode. The authors propose two patented design variants [24]. Key parameters: load capacity up to 5 t (bunch volume up to 6 solid m³), trolley weight 380 kg, clamping force of jaws at least 35 kN, hydraulic system working pressure 16–20 MPa, grab/release cycle time 5–8 s. Attachment to a tractor (e.g., MTZ-320) is via a category 2 three-point hitch (GOST 3480–76). During the working stroke, the trolley rolls on 6.50–10 pneumatic tyres, relieving the tractor’s rear axle by 35–40%, reducing traction resistance by 25–30% and specific ground pressure to 0.02–0.03 MPa (3–4 times lower than with choker skidding), and rut depth to 5–8 cm. During idle travel, the trolley is raised to a clearance of at least 400 mm, increasing tractor manoeuvrability (turning radius reduced by 20–25%) and reducing chassis wear. Traction calculation for the MTZ-320 tractor (power 26.48 kW, $\eta=0.85$) showed a tangential traction force of 16.55 kN, permissible bunch weight of 30.8 kN, bunch volume of 2.8–3.9 m³ depending on log length (4.5 m). Shift productivity at a skidding distance of 100 m and a log volume of 0.38 m³ is 97.7–104.8 m³/shift depending on the speed mode (idle speed 1.81–2.49 m/s, loaded speed 1.02–1.36 m/s). The developed 3D models and kinematic schemes confirm the trolley’s adaptation to terrain irregularities (angular movements up to $\pm 15^\circ$) and high maintainability in field conditions.

Keywords: logging, skidding, skidding attachments, skidding trolley, modeling, environmental sustainability of forest management

Funding: The work was carried out without additional funding.

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

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

For citation: Sivakov V. V., Zaikin A. N., Zelikov V. A. (2026) Justification of parameters and development of designs for mounted skidding carts for general-purpose tractors. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 217–233 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/14>.

Received 25.01.2026. **Revised** 20.02.2026. **Accepted** 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Повышение производительности труда на основе комплексной механизации и автоматизации производственных процессов является одной из важнейших задач лесной промышленности. Однако применение тяжелой техники зачастую приводит к серьезным экологическим последствиям. Перемещение лесовозных машин по естественному грунту наносит ущерб почве и оставшимся деревьям, размер которого зависит от вида, сопротивления и

состояния почвы, от массы и частоты движения машин, а также от длины бревен [1–3]. Для снижения вредного воздействия лесозаготовительной техники на почву предлагается учитывать рельеф местности, подбирать модификации машин и эффективно осуществлять планирование лесозаготовок [4–7].

На лесозаготовительных предприятиях наблюдается устойчивая тенденция к внедрению постепенных (выборочных) рубок леса [8, 9]. Однако номенклатура машин, специализированных для выборочных рубок,

выпускаемых как зарубежными, так и отечественными производителями, остаётся ограниченной. Применение технологического оборудования с клещевым захватом делает возможной трелёвку как сформированных валочно-пакетирующими машинами пачек деревьев, так и одиночных деревьев (хлыстов), а также составленных из них пачек. Основным преимуществом трелёвки пачками является то, что захват и транспортировка всей пачки происходят за один цикл, что заметно сокращает временные затраты на погрузочно-разгрузочные работы, увеличивает долю транспортной составляющей в работе трелёвочного трактора и, как следствие, повышает его производительность [10, 11]. Вместе с тем указанный способ предъявляет повышенные требования к пачке: она должна быть компактно сформирована, располагаться в удобном для подъезда трактора месте и обеспечивать полную загрузку агрегата [3]. Недостатком метода выступает необходимость использования дорогостоящих валочно-пакетирующих машин. Вследствие этого валку преимущественно выполняют бензопилами, что существенно затрудняет сбор трелюемой пачки [6].

Кроме того, в настоящее время [27] по различным причинам производство специальных лесозаготовительных машин для сплошных рубок леса практически прекращено, а для рубок ухода такая техника никогда не выпускалась. В связи с этим для выполнения лесозаготовительных работ предлагаются разнообразные варианты использования тракторов общего назначения, оснащаемых специальными навесными приспособлениями [12, 13].

При выборе лесозаготовительной техники (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, сортиментовозов) необходимо учитывать не только их технические характеристики, но и возможность интеграции в единое цифровое пространство, позволяющее осуществлять оперативное планирование работы машинных комплексов [14–16], контроль технического состояния машин и управление их техническим обслуживанием и ремонтом посредством телекоммуникационных технологий [17–19].

Цель работы

Разработка навесного трелёвочного приспособления для бесчokerной трелёвки сортиментов или маломерных деревьев (хлыстов) на базе трактора общего назначения, (малогабаритного трактора типа МТЗ-320).

Материалы и методы

Объектом исследования являлись навесные трелёвочные приспособления, агрегируемые с тракторами общего назначения, а также разработанные авторами конструкции трелёвочных тележек на основе патентного решения [24]. Предметом исследования выступали

кинематические, геометрические и тягово-энергетические параметры указанных устройств.

Теоретическую базу исследования составили труды отечественных и зарубежных учёных в области механизации лесозаготовок и экологии лесопользования, а также нормативно-техническая документация, включая ГОСТ 3480–76 на трёхточечную навеску. Сбор первичной информации осуществлялся методом систематического поиска по базам данных eLibrary.ru, ResearchGate.net и открытым интернет-ресурсам с формированием запроса «трелёвочные приспособления к лесозаготовительной технике» и его англоязычных аналогов. Дополнительно применялся метод патентного поиска, в рамках которого проанализирована отечественная и зарубежная патентная документация, включая патент [25]. Обработка полученных данных выполнялась методами контент-анализа и сравнительной оценки конструктивных решений, что позволило систематизировать существующие трелёвочные устройства (лебёдки, клещевые захваты, трелёвочные тележки) и выявить их преимущества и недостатки. На основе проведённого анализа разработана авторская классификация методов трелёвки (рисунок 1) и видов трелёвочных приспособлений для бесчokerной трелёвки (рисунок 4).

Геометрическое и параметрическое 3D-моделирование разработанной патентной конструкции трелёвочной тележки выполнялось в среде твердотельного моделирования. На основе построенных трёхмерных моделей (рисунки 11 и 12, б) проведён кинематический анализ механизма подъёма стрелы и захвата, определены зоны рабочих перемещений, углы поворота ротатора (360°), траектории движения клещевин и их предельные положения. Исследованы угловые перемещения стрелы (до $\pm 15^\circ$ относительно горизонтали) и синхронизация работы гидроцилиндров.

Тяговый расчёт агрегата, включающего трактор МТЗ-320 с навесной тележкой, выполнен аналитическим методом на основе уравнения равномерного движения с учётом коэффициентов сопротивления, веса трактора, веса пачки, уклона местности и сцепных качеств движителя. Расчётные зависимости позволили определить касательную силу тяги (16,55 кН), оптимальный вес трелюемой пачки (30,84 кН), объём пачки (2,8–3,9 м³), а также выполнить проверку по сцеплению. Дополнительно проведён расчёт сменной производительности по общепринятой методике с учётом продолжительности смены (28800 с), времени на подготовительно-заключительные работы (3000 с) и коэффициента использования рабочего времени (0,85). Производительность определена для различных расстояний трелёвки

(от 100 до 300 м) и объёмов хлыста (от 0,24 до 0,38 м³) при двухскоростных режимах (холостой ход 1,81 и 2,49 м/с, гружёный ход 1,02 и 1,36 м/с).

Результаты

Трелёвка древесины относится к числу технологически сложных и потенциально опасных лесозаготовительных операций. Для повышения безопасности и эффективности этого процесса разработаны различные средства механизированной трелёвки, которые могут быть реализованы как на гужевой тяге, так и с использованием механических энергетических средств (рисунок 1).

В качестве тяговых агрегатов применяются тракторы общего назначения, специализированные трелёвочные тракторы, гужевой транспорт, а также малогабаритные средства механизации – мини-тракторы [20, 21], квадроциклы и другие мотоприспособления. Наиболее простым (примитивным) способом конной трелёвки является перемещение бревна с помощью цепи или клещей (рисунок 2). При таком способе бревно полностью волочится по грунту или снежному покрову. Вследствие шероховатости поверхности бревна (наличия

коры, сучков, неровностей) возникает значительное сопротивление движению. Коэффициент сопротивления (удельное тяговое сопротивление) на горизонтальном участке варьируется в зависимости от сезона и состояния волока: в летний период при отсутствии подготовленного волока он составляет 0,75 и выше, при движении по ровному волоку – 0,58; зимой при движении по ровному волоку – 0,32. Менее энергозатратным вариантом является трелёвка бревна на тележке (рисунок 2, б), позволяющая частично разгрузить комлевую часть и снизить сопротивление перекатыванию.

На лесозаготовках трелёвочные лебёдки (рисунок 3) используются для транспортировки поваленных деревьев, хлыстов, сортиментов и являются эффективными как при выборочных рубках, так и при преодолении труднодоступных участков лесной местности [22, 23]. В настоящее время предлагается достаточно большое количество лебёдок как отечественного, так и зарубежного производства.

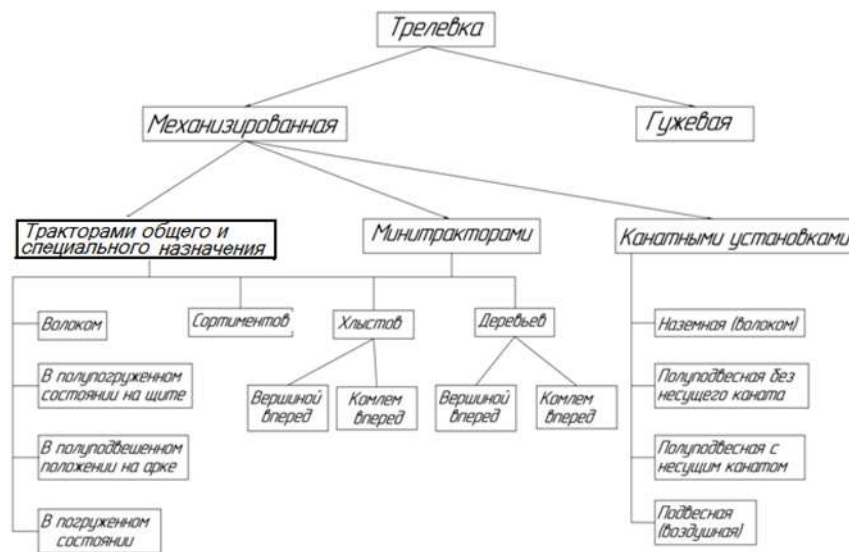


Рисунок 1 / Figure 1. Классификация методов трелёвки / Classification of skidding methods

Источник: собственная схема авторов / Source: authors' own scheme



Рисунок 2 Схема трелёвки лошадью
Horse skidding scheme

Источник: <https://pxhere.com/de/photo/785550>, <https://ru.pinterest.com/pin/944348615584140618/>



Рисунок 3 / Трелёвочная лебёдка ЛТН-50 /
Figure 3. Skidding winch LTN-50

Источник: <https://clck.ru/3NWmRD>

Среди различных технических средств механизации при рубках ухода широко применяются устройства для бесчокерной трелёвки леса – навесные гидрофицированные захватные механизмы (грейферного или челюстного типа), монтируемые на заднюю трёхточечную навеску трактора. Грузоподъёмность таких устройств составляет от 1,5 до 5 тонн (объём пачки – до 6 плотных м³), масса собственно захватного оборудования не превышает 350–400 кг. Рабочее давление в гидросистеме – 16–20 МПа, усилие зажима на клещевинах – не менее 25–35 кН. Время полного цикла захват/сброс – 5–8 секунд. Ротатор (при наличии) обеспечивает поворот захвата в горизонтальной плоскости на угол до 360°, что позволяет ориентировать комли пачки при штабелировании.

Помимо трелёвки из лесонасаждений отдельных деревьев (диаметром до 30 см) и небольших пачек (2–5 брёвен) при проведении рубок ухода, такие трелёвочные приспособления

успешно используются для штабелирования, выравнивания торцов и окучивания трелёванной древесины, а также для очистки вырубков от порубочных остатков (возможен захват пучков сучьев и веток длиной до 3 м). Скорость трелёвки с грузом – до 5–7 км/ч на волоках, на холостом ходу – до 10–12 км/ч. Радиус маневра при поднятом захвате (клиренс под захватом не менее 500 мм) уменьшается на 20–30% по сравнению с чокерной трелёвкой, что критично в стеснённых условиях лесосеки.

Как правило, эти устройства являются навесными или съёмными (время монтажа/демонтажа – не более 15–20 минут) и агрегируются с широко распространёнными в лесном хозяйстве колёсными тракторами тяговых классов 0,6...1,4 кН (МТЗ-80/82, ЛТЗ-55, Беларус-320). Применение бесчокерной трелёвки позволяет снизить удельное давление на почву до 0,02–0,03 МПа (в 3–4 раза ниже, чем при волочении пачки чокером), сократить глубину колеи с 20–30 см до 5–8 см и уменьшить

повреждение корневой системы оставляемых деревьев на 60–70%.



Классификация средств механизации трелёвки представлена на рисунке 4 / Figure 4.

Рисунок 4 / Figure 4. Виды трелёвочных приспособлений для бесчокерной трелёвки / Types of skidding attachments for chokerless skidding
 Источник: собственная схема авторов / Source: authors' own scheme

Основными производителями трелёвочных приспособлений, используемых в нашей стране, являются как отечественные, так и зарубежные компании. Большинство этих устройств гидрофицированы, адаптированы к гидросистемам агрегируемых тракторов и управляются с рабочего места оператора. Например, Великолукский машиностроительный завод «ВЕЛМАШ» выпускает широкую гамму клещевых захватов, которыми комплектуются трелёвочные приспособления для работы с сортаментами различной грузоподъёмности: С 70.48, С Р-20, С 30.30, С 70.40, С 70.41, С А-47.

Устройство трелёвочное универсальное УТУ-2 «ПАУК-М» (рисунок 5 / Figure 5) предназначено для транспортирования деревьев и хлыстов при проведении рубок леса, позволяет штабелировать бревна с помощью захвата на высоту до 1,55 м, а с помощью зажимной лапы – на высоту до 0,74 м. Толкателем-стенкой можно сталкивать остатки сучьев и веток при очистке площадки, а также подталкивать бревна к местам штабелирования.

Захват трелёвочный ЗТ-140 М (рисунок 6 / Figure 6) предназначен для бесчокерной трелёвки хлыстов и лесоматериалов диаметром от 50 до 700 мм на территории лесосеки. Представляет собой навесное оборудование, устанавливаемое на тракторы «Беларус» модификаций 82.2; 892.2; 920.2; 950.2; 952.2, 1221 (требуется

дополнительный комплект ЗИП) с наличием задней сельскохозяйственной навески.

Также применяются зарубежные конструкции трелёвочных приспособлений, как правило, с манипулятором. К ним относятся Uniforest Scorpion Pro1/Pro2/Pro3 (рисунок 7 / Figure 7), HRZ Fix-EZ (рисунок 8 / Figure 8) – комбинированный вариант (трелёвка и погрузка) – и другие.

Грейферные захваты устанавливают на колёсные и гусеничные тракторы или экскаваторы как отечественного, так и иностранного производства. Грейферный захват HRK – это трелёвочно-погрузочный манипулятор, оборудованный выдвижной стрелой, подъёмным гидроцилиндром и упорным погрузочным щитом, предназначенный для волочения, погрузки-разгрузки бревен и древесных стволов (рисунок 9 / Figure 9).

На основании проведённого анализа можно сделать вывод, что наиболее эффективным решением среди трелёвочных приспособлений является использование трелёвочной тележки с захватом, позволяющей механизировать процесс захвата трелюемых бревен и их перемещение в полуподвешенном состоянии.

2. Разработка новых конструкций трелёвочных тележек

Авторами предложены два варианта конструкции трелёвочной тележки, основанные на

патентном решении [24], позволяющем повысить эффективность процесса трелёвки.

На основании проведённого аналитического обзора установлено, что наибольшей эффективностью среди технических средств для трелёвки обладает навесная трелёвочная тележка с захватным механизмом, обеспечивающая механизацию процессов захвата трелюемых лесоматериалов и их перемещения в полуподвешенном состоянии [3]. В развитие данного направления авторами на основе

патентного решения [24] предложены два варианта конструктивного исполнения трелёвочной тележки. Конструкция первого варианта (рисунок 10) содержит две опорные стойки 1, установленные на пневматических колёсах и связанные между собой горизонтальной поперечной балкой 2.



Рисунок 5 / Figure 5. Устройство трелёвочное универсальное УТУ-2 «ПАУК-М» / Universal skidding device UTU-2 "PAUK-M"

Источник: <https://clck.ru/3MsLC4>



Рисунок 6 / Figure 6. Захват трелёвочный ЗТ-140 М / Skidding grapple ZT-140 M

Источник: <https://clck.ru/3MsLCK>



Рисунок 7 / Figure 7. Захват для бревен Uniforest Scorpion Pro1/Pro2/Pro3 / Uniforest Scorpion Pro1/Pro2/Pro3 log grab

Источник: <https://clck.ru/3MsLBH>



Рисунок 8 / Figure 8. Трелёвочный грейферный захват HRZ Lader / HRZ Lader skidding grapple

Источник: <https://clck.ru/3MsLDE>



Рисунок 9 / Figure 9. Трелёвочный грейферный захват на тележке HRZ Fix-HRK / HRZ Fix-HRK skidding grapple on trolley

Источник: <https://clck.ru/3MsLCY>

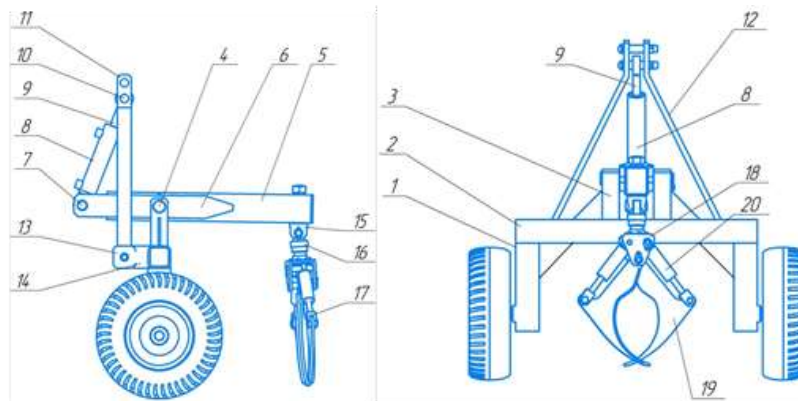


Рисунок 10. Навесная трелёвочная тележка (первый вариант) – схема

Figure 10. Mounted skidding trolley (first version) – scheme

Источник: разработано авторами / Source: developed by the authors

В центральной части указанной балки зафиксированы две вертикальные стойки 3, между которыми на оси 4 размещена горизонтальная продольная балка 5, дополнительно усиленная двумя пластинами 6. На торце пластин 6 посредством оси 7 закреплён корпус силового гидроцилиндра 8, шток 9 которого через ось 10 соединён с навесным устройством 11, предназначенным для агрегатирования тележки с трёхточечной навесной системой трактора. Данное навесное устройство включает раскосы 12, горизонтальную балку 13 и кронштейны 14, образующие единый узел с горизонтальной поперечной балкой 2. Подключение силового гидроцилиндра 8 к гидравлической системе трактора осуществляется через гибкие рукава высокого давления.

На противоположном конце горизонтальной продольной балки 5 на кронштейне 15 установлен ротатор 16 с гидравлическим захватом 17. Захват состоит из траверсы 18, двух клещевин 19 и двух гидроцилиндров 20, которые также подключены к гидросистеме трактора [2, 5].

Предложенная кинематическая схема позволяет механизировать операции захвата и сброски трелюемых сортиментов или хлыстов, осуществлять трелёвку в полуподвешенном

состоянии [3] при перемещении тележки непосредственно по поверхности почвы, что обеспечивает разгрузку задней оси трактора, снижение энергетических затрат и уменьшение негативного воздействия на почвенный покров. Благодаря применению трёхточечной навески (элементы 12–14) тележка эффективно адаптируется к неровностям рельефа и воспринимает значительные эксплуатационные нагрузки в рабочем режиме. При холостом ходе поднятие тележки над поверхностью почвы способствует снижению интенсивности износа ходовой части (опоры 1 и колёса) и повышению манёвренности трактора, что приобретает особую значимость в условиях стеснённого пространства лесосеки [2].

Разработанная 3D-модель трелёвочной тележки представлена на рисунке 11.

Второй вариант навесной трелёвочной тележки (рисунок 12, а) включает опорные стойки 1 с ходовыми колёсами 2, горизонтальную поперечную балку 3, а также стойки 4 с раскосами 5. На оси 6, размещённой между стойками 4, закреплена стрела 7. К одному концу стрелы 7 прикреплены кронштейны 8 с осью 9, на которой зафиксирован шток 10 силового гидроцилиндра 11, при этом корпус гидроцилиндра закреплён на нижней поперечной горизонтальной балке 12.

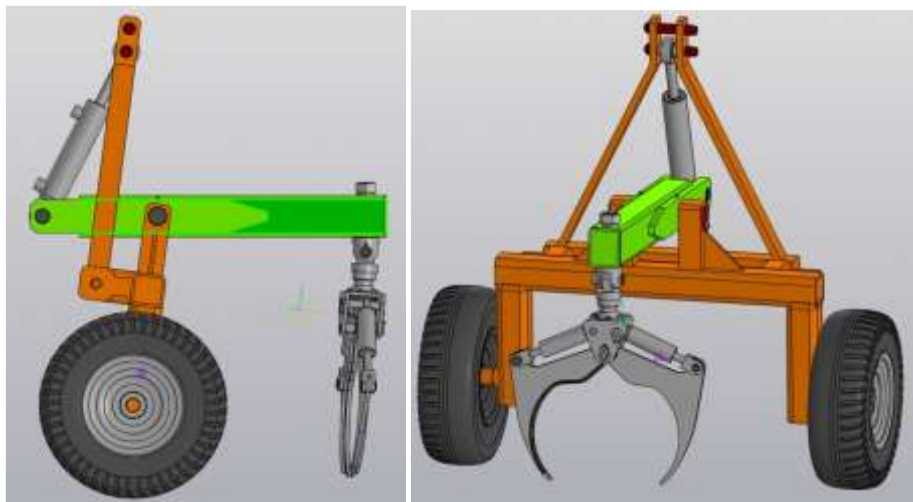


Рисунок 11 3D-модель навесной трелёвочной тележки (первый вариант)
Figure 11. 3D model of the mounted skidding trolley (first version)

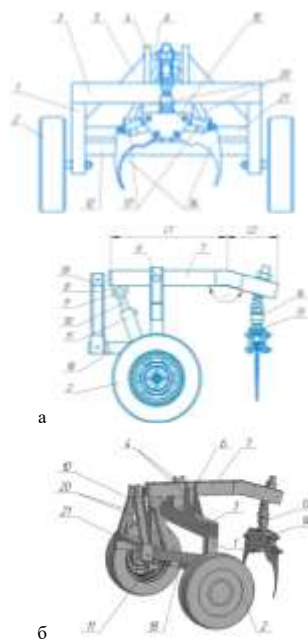


Рисунок 12. Навесная трелёвочная тележка (второй вариант)
Figure 12. Mounted skidding trolley (second version):
а – схема / a – scheme; б – 3D-модель / b – 3D model

На втором конце стрелы 7 закреплён гидравлический захват 13, включающий ротатор 14, траверсу 15, две клещевины 16 и два гидроцилиндра 17, подключённых к гидросистеме трактора. Навесное оборудование 19, включающее раскосы 20 и балку 21, крепится к опорным стойкам 1 с помощью раскосов 18. Это крепление позволяет присоединять тележку к трёхточечной навеске трактора.

Стрела 7 состоит из двух секций, расположенных под углом 165° друг к другу. Такая конструкция минимизирует риск столкновения конца перемещаемого сортимента (или пачки) со стрелой 7, что повышает общую

надёжность тележки. Соотношение длины горизонтальной части L_1 стрелы 7 к длине наклонной части L_2 составляет 1:0,45. Это уменьшает нагрузку, которую силовой гидроцилиндр 11 прикладывает к стреле 7.

Предложенная кинематическая схема второго варианта, аналогично первому, обеспечивает механизацию процессов захвата и сброски трелюемых сортиментов или хлыстов, а также позволяет осуществлять трелёвку в полуподвешенном состоянии при перемещении тележки непосредственно по поверхности почвы. Это способствует разгрузке задней оси трактора, снижению энергетических затрат и уменьшению

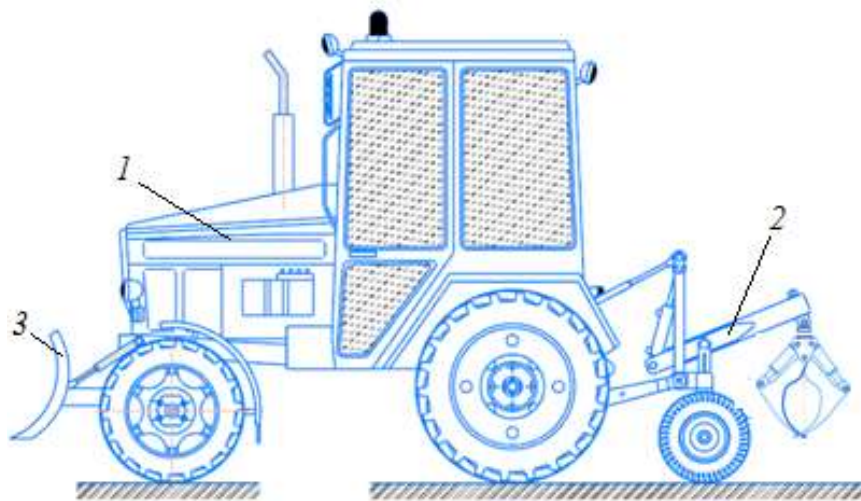
негативного воздействия на почвенный покров. Благодаря трёхточечной навеске (элементы 19–21) и шарнирному креплению стрелы 7 на оси 6 тележка эффективно адаптируется к неровностям рельефа и воспринимает значительные эксплуатационные нагрузки в рабочем режиме. При холостом ходе подъём тележки (посредством силового гидроцилиндра 11) обеспечивает снижение интенсивности износа ходовой части (опорные стойки 1 и колёса 2) и повышает манёвренность трактора, что особенно важно в условиях ограниченного пространства лесосеки.

Принцип работы навесной трелёвочной тележки. Трактор с тележкой, поднятой над грунтом, подъезжает к сортименту (группе сортиментов, хлыстов) таким образом, чтобы гидравлический захват 13 оказался над сортиментом на расстоянии 40–50 см от его торца. С помощью гидроцилиндра навески трактора по команде оператора тележка опускается на грунт, а посредством ротатора 14 гидравлический захват 13 ориентируется относительно сортимента. По команде оператора гидроцилиндры 17 раскрывают клещевины 16 захвата, после чего подаётся рабочая жидкость в поршневую полость силового гидроцилиндра 11, шток 10 которого перемещается вверх, поднимая связанный с ним конец стрелы 7; при этом противоположный конец стрелы с захватом 13 опускается. При достижении

захватом уровня грунта клещевины сводятся, осуществляя захват сортимента. Далее оператор переключает гидроцилиндр 11 в обратное положение, шток 10 опускается, противоположный конец стрелы поднимается, приподнимая сортимент над грунтом. Трактор перемещается к месту разгрузки. По прибытии клещевины раскрываются, и сортимент падает на грунт. Затем тележка поднимается, и цикл повторяется.

Агрегатирование тележки с трактором через трёхточечную навеску обеспечивает адаптацию к неровностям рельефа, восприятие эксплуатационных нагрузок и свободу маневра. При холостом ходе тележка поднимается над поверхностью почвы, что повышает манёвренность трактора и снижает износ ходовых колёс тележки.

Предложенные варианты трелёвочной тележки могут быть агрегатированы с различными транспортными средствами, в частности с трактором «Беларусь МТЗ-320», что расширяет его функциональные возможности и позволяет использовать его на лесозаготовках для трелёвки как отдельных поваленных деревьев, хлыстов или сортиментов, так и пачек небольшого объёма. Общий вид трактора МТЗ-320 с навесной трелёвочной тележкой представлен на рисунке 13.



1 – трактор Беларусь МТЗ-320; 2 – навесное трелёвочная тележка;
3 – бульдозерный отвал

Рисунок 13. Трактор МТЗ-320 с навесной трелёвочной тележкой
Figure 13. Belarus MTZ-320 tractor with mounted skidding trolley

3. Тяговый расчёт и определение производительности

Объём пачки сортиментов, трелюемой трактором, не должен превышать тяговое усилие трактора по сцеплению. Уравнение равномерного

движения трактора с грузом для трелёвки в полуподвешенном состоянии (расчётная схема на рисунке 14 / Figure 14) имеет вид:

$$F_k = P(f_T \pm i) + k \cdot G_n(f_T \pm i) + (1 - k) \cdot G_n(f_T \pm i), (1)$$

где F_k – касательная сила тяги трактора, Н; P – вес трактора, кН; G_n – вес трелюемой пачки, кН; f_t – удельное сопротивление движению трактора, Н/кН; k – коэффициент, учитывающий расположение веса пачки между коником трактора и волоком; f_r – удельное сопротивление движению пачки по волоку, Н/кН; i – уклон местности, %.

Для трактора МТЗ-320 мощность двигателя $N = 26478$ Вт, коэффициент полезного действия $\eta = 0,85$, скорость движения на второй передаче $v = 1,36$ м/с. Касательная сила тяги:

$$F_k = \frac{N \cdot \eta}{v} = \frac{26478 \cdot 0,85}{1,36} = 16548,75 \text{ Н.}$$

Вес трелюемой пачки определяется из формулы (1). Приняв $P = 17,0$ кН, $f_t = 0,25$ Н/кН, $i = 0,025$, $k = 0,7$, $f_r = 0,7$ Н/кН, получаем:

$$G_n = \frac{F_k - P(f_t \pm i)}{k(f_t \pm i) + (1 - k)(f_r \pm i)} = \frac{16548,75 - 17,0(0,25 + 0,025)}{0,7(0,25 + 0,025) + (1 - 0,7)(0,7 + 0,025)} = 30840,9 \text{ Н.}$$

Проверка по сцеплению:

$$F_{сц} = (P + kG_n)\mu = (15600 + 0,6 \cdot 59094,1) \cdot 0,4 = 20422,6 \text{ Н,}$$

где $\mu = 0,4$ – коэффициент сцепления колёс с грунтом (леса). Условие $F_{сц} \geq F_k$ выполняется.

Объём пачки (м^3) при объёмном весе древесины $\gamma = 8000$ Н/м³:

$$Q = \frac{G_n}{\gamma} = \frac{30840,9}{8000} = 3,9 \text{ м}^3.$$

При длине сортимента 4,5 м площадь захвата составит $S = 3,9/4,5 = 0,86 \text{ м}^2$. Радиус клещевин:

$$R = \sqrt{\frac{S}{K_y \pi}} = \sqrt{\frac{0,86}{0,8 \cdot 3,14}} = 0,58 \text{ м,}$$

где $K_y = 0,8$ – коэффициент плотности сортиментов в захвате. Из конструктивных соображений принимаем $R = 0,4$ м. Тогда фактическая площадь захвата:

$$S = \frac{\pi R^2}{0,8} = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{0,8} = 0,63 \text{ м}^2.$$

Объём трелюемой пачки $Q = 0,63 \cdot 4,5 = 2,8 \text{ м}^3$, вес $G_n = 2,8 \cdot 8000 = 22400$ Н.

Сменную производительность трактора определяем по формуле:

$$\Pi = \frac{(T_c - t_{пз}) \cdot \varphi_1 \cdot Q_{ср}}{t_{ц}},$$

где $T_c = 28800$ с (продолжительность смены); $t_{пз} = 3000$ с (время на подготовительно-заключительные работы); $\varphi_1 = 0,85$ – коэффициент использования времени смены; $Q_{ср} = 2,8 \text{ м}^3$ – объём пачки; $t_{ц}$ – средняя продолжительность рейса, с.

Время цикла:

$$t_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4,$$

где t_1 и t_2 – время движения трактора в холостом и грузовом направлениях; t_3 – время на прицепку и формирование пачки; t_4 – время на отцепку.

Расчёты проведены для средних расстояний трелёвки 100–300 м и объёмов хлыста 0,24–0,38 м³. Результаты сведены в таблицы 1–7 / Tables 1–7.

При увеличении скоростей движения ($V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с) значения времени цикла и производительности изменяются (таблицы 6 и 7 / Tables 6 and 7, рисунок 16 / Figure 16).

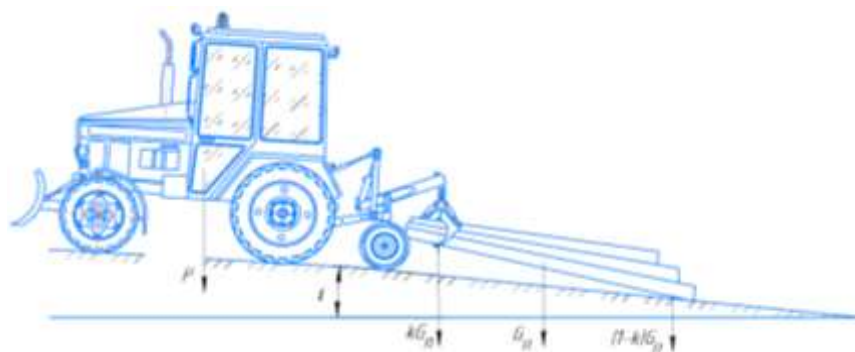


Рисунок 14 Расчётная схема нагрузки на трелёвочный трактор
Figure 14. Design scheme of load on the skidding tractor

Технологии. Машины и оборудование

Таблица 1

Время движения трактора в холостом направлении t_1 , с

Table 1

Tractor travel time in idle direction t_1 , s

Средняя скорость, м/с / Average speed, m/s	Значение t_1 в зависимости от среднего расстояния трелёвки, м / Value of t_1 depending on the average skidding distance, m				
	100	150	200	250	300
1,81	55,3	82,9	110,5	138,1	165,8
2,49	40,2	60,2	80,3	100,4	120,5

Таблица 2

Время движения трактора в грузовом направлении t_2 , с

Table 2

Tractor travel time in loaded direction t_2 , s

Средняя скорость, м/с / Average speed, m/s	Значение t_2 в зависимости от среднего расстояния трелёвки, м / Value of t_2 depending on the average skidding distance, m				
	100	150	200	250	300
1,02	98,0	147,1	196,1	245,1	293,5
1,36	73,5	110,3	147,1	183,8	220,6

Таблица 3

Время на прицепку и отцепку пачки $t_3 + t_4$, с

Table 3

Time for hitching and unhitching the bunch $t_3 + t_4$, s

Объём хлыста, м³ / Log volume, m³	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
$t_3 + t_4$	588,3	556,9	530,0	506,7	486,3	468,2	452,2	437,9

Таблица 4

Время цикла трелёвки $t_{ц}$, с, при $V_{хол} = 1,81$ м/с, $V_{гр} = 1,02$ м/с

Table 4

Skidding cycle time $t_{ц}$, s, at $V_{idle} = 1.81$ m/s, $V_{loaded} = 1.02$ m/s

Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m	Объём хлыста, м³ / Log volume, m³							
	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
100	741,6	710,2	683,3	660,0	639,6	621,5	605,5	591,2
150	818,2	786,8	759,9	736,6	716,2	698,1	682,1	667,8
200	894,9	863,5	836,6	813,3	792,9	774,8	758,8	744,5
250	971,5	940,1	913,2	889,9	869,5	851,4	835,4	821,1
300	1047,6	1016,2	989,3	966,0	945,6	927,5	911,5	897,2

Таблица 5

Сменная производительность П, м³, при $V_{хол} = 1,81$ м/с, $V_{гр} = 1,02$ м/с

Table 5

Shift productivity П, m³, at $V_{idle} = 1.81$ m/s, $V_{loaded} = 1.02$ m/s

Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m	Объём хлыста, м³ / Log volume, m³							
	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
100	77,9	81,4	84,6	87,6	90,4	93,0	95,4	97,7
150	70,6	73,4	76,0	78,5	80,7	82,8	84,7	86,5
200	64,6	66,9	69,1	71,1	72,9	74,6	76,2	77,6
250	59,5	61,5	63,3	64,9	66,5	67,9	69,2	70,4
300	55,2	56,9	58,4	59,8	61,1	62,3	63,4	64,4

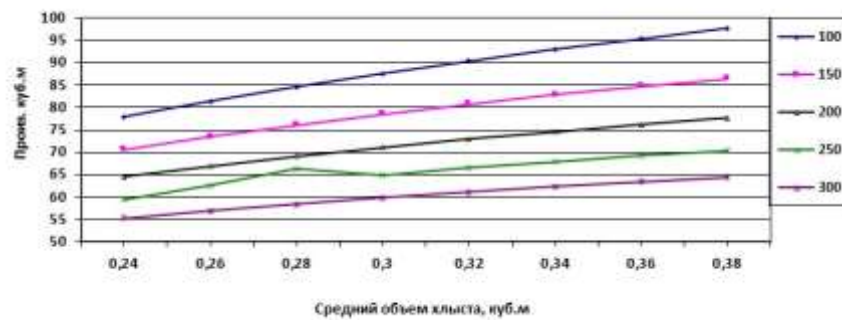


Рисунок 15. Зависимость сменной производительности трактора от среднего объема хлыста и расстояния трелёвки ($V_{хол} = 1,81$ м/с, $V_{гр} = 1,02$ м/с)

Figure 15. Dependence of tractor shift productivity on average log volume and skidding distance ($V_{idle} = 1.81$ m/s, $V_{loaded} = 1.02$ m/s)

Таблица 6

Время цикла трелёвки $t_{ц}$, с, при $V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с

Table 6

Skidding cycle time $t_{ц}$, s, at $V_{idle} = 2.49$ m/s, $V_{loaded} = 1.36$ m/s

Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m	Объём хлыста, м³ / Log volume, m³							
	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
100	702,0	670,6	643,7	620,4	600,0	581,9	565,9	551,6
150	758,8	727,4	700,5	677,2	656,8	638,7	622,7	608,4
200	842,7	811,3	784,4	761,1	750,7	722,6	706,6	692,3
250	872,5	841,1	814,2	790,9	770,5	752,4	736,4	722,1
300	929,4	898,0	871,1	847,8	827,4	809,3	793,3	779,0

Таблица 7

Сменная производительность Π , м³, при $V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с

Table 7

Shift productivity Π , m³, at $V_{idle} = 2.49$ m/s, $V_{loaded} = 1.36$ m/s

Расстояние трелёвки, м / Skidding distance, m	Объём хлыста, м³ / Log volume, m³							
	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
100	83,3	86,2	89,8	93,1	96,3	99,3	102,1	104,8
150	76,2	79,4	82,5	85,3	88,0	90,5	92,8	95,0
200	68,6	71,2	73,7	75,9	77,0	80,0	81,8	83,5
250	66,2	68,7	71,0	73,1	75,0	76,8	78,5	80,0
300	62,2	64,4	66,3	68,2	69,8	71,7	72,8	74,2

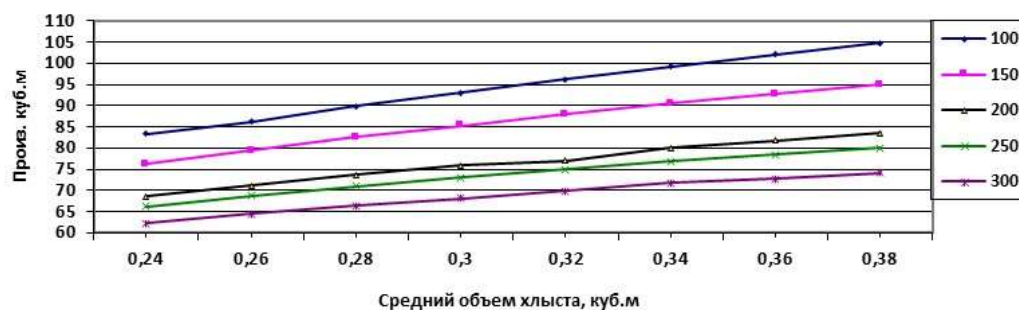


Рисунок 16. Зависимость сменной производительности трактора от среднего объема хлыста и расстояния трелёвки ($V_{хол} = 2,49$ м/с, $V_{гр} = 1,36$ м/с)

Figure 16. Dependence of tractor shift productivity on average log volume and skidding distance ($V_{idle} = 2.49$ m/s, $V_{loaded} = 1.36$ m/s)

Обсуждение

Проведённый обзор свидетельствует о том, что повышение эффективности лесозаготовительных работ достижимо за счёт совершенствования трелёвочных приспособлений — захватов, лебёдок и тележек, — которые могут использоваться в составе тракторов общего назначения. Вместе с тем, применение исключительно трелёвочных захватов, агрегируемых с такими тракторами, является недостаточным [2]. Это обусловлено тем, что на заднюю ось трактора дополнительно передаётся нагрузка от трелюемого бревна (или пачки), что приводит к увеличению давления колёс на почву. Кроме того, при движении на уклоне указанное обстоятельство может вызывать потерю сцепления передних колёс с грунтом и создавать предпосылки для опрокидывания трактора.

Предложенная навесная трелёвочная тележка позволяет разгрузить заднюю ось трактора, снизить энергетические затраты и уменьшить вредное воздействие на почвенный покров за счёт перекачивания тележки непосредственно по поверхности грунта. Анализ производительности (таблицы 5, 7; рисунки 15, 16) показывает, что с увеличением объёма хлыста и скорости движения производительность возрастает, причём при расстоянии трелёвки 100 м и объёме хлыста 0,38 м³ она достигает 97,7–104,8 м³/смену в зависимости от скоростного режима.

Выводы

1. Перспективным техническим решением признаётся навесная трелёвочная тележка, оснащённая захватным механизмом грейферного или челюстного типа, который обеспечивает автоматизированный захват, надёжную фиксацию и принудительное освобождение трелюемых сортиментов либо хлыстов. Процесс трелёвки реализуется в полуподвешенном режиме, при котором тележка перемещается непосредственно по грунту (на лыжах либо колёсах малого диаметра), а комлевая часть пачки волочится за ней. Подобная кинематическая схема способствует разгрузке заднего моста трактора за счёт перераспределения

вертикальной нагрузки на переднюю ось и навесную систему, позволяет снизить тяговое сопротивление на 25–30% благодаря уменьшению трения пачки о грунт, а также уменьшает удельное давление на почвенный покров, что имеет критическое значение для сохранности лесных экосистем.

2. На основе запатентованного конструктивного решения разработаны две модификации тележек, различающиеся типом захватного органа и конструкцией системы поддрессирования. Обе модификации отличаются модульным исполнением, агрегируются с тракторами общего назначения тягового класса 1,4–3,0 посредством стандартной трёхточечной навески категории 2 или 3 и не нуждаются в дополнительной гидрофикации, поскольку управление захватом осуществляется механическим или тросовым способом. Простота конструкции обуславливает высокую ремонтпригодность в условиях полевого сервиса.
3. Благодаря жёсткой трёхточечной навеске, оснащённой компенсаторами люфтов, обеспечивается адаптация тележки к микрорельефу волока за счёт угловых перемещений в продольной и поперечной плоскостях в диапазоне до $\pm 15^\circ$, что позволяет выдерживать пиковые эксплуатационные нагрузки, достигающие 2,5 от номинальной грузоподъёмности, без возникновения необратимых деформаций. При холостом ходе (порожня тележка) гидравлическая система трактора переводит её в транспортное положение с дорожным просветом не менее 400 мм, что полностью исключает контакт ходовой части с грунтом, уменьшает абразивный износ опорных элементов и повышает манёвренность трактора, сокращая радиус поворота на 20–25%, что является ключевым преимуществом при работе на стеснённых лесосеках.

Список литературы

1. Marra E., Laschi A., Fabiano F. et al. Impacts of wood extraction on soil: assessing rutting and soil compaction caused by skidding and forwarding by means of traditional and innovative methods. *European Journal of Forest Research*. 2022; 141: 1–16. – DOI: 10.1007/s10342-021-01420-w.
2. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L. et al. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*. 2022; 8: 3–25. – DOI: 10.1007/s40725-021-00155-6.
3. Borz S.A., Mariş A.C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023; 14(2): 265. – DOI: 10.3390/f14020265.

4. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023; 14(2): 296. – DOI: 10.3390/f14020296.
5. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*. 2015; 338: 124–138.
6. Solgi A., Najafi A., Page-Dumroese D.S., Zenner E.K. Assessment of topsoil disturbance caused by different skidding machine types beyond the margins of the machine operating trail. *Geoderma*. 2020; 367: 114238.
7. Szewczyk K., Iwanicki P. Evaluating the suitability of machinery use during skidding of wood in pine stands. *Forest Research Papers*. 2019; 80: 219–226. – DOI: 10.2478/frp-2019-0020.
8. Handžić S., Đukić M., Petković V., Marčeta D. Productivity of TIMBERJACK 240A and LKT 81T Skidders at Selective Cutting and Longer Distances. *South-east European forestry*. 2024; 15. – DOI: 10.15177/seefor.24-08.
9. Kulak D., Stańczykiewicz A., Szewczyk G. Productivity and Time Consumption of Timber Extraction with a Grapple Skidder in Selected Pine Stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017; 38: 55–63.
10. Borz S., Mariş A.-C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023; 14: 265. – DOI: 10.3390/f14020265.
11. Visser R., Spinelli R. Assessment of a winch-assisted skidder in Castle Downs Forest, New Zealand. – 2020.
12. Dudek T., Janas D. The Productivity and the Costs Forwarding Wood of a Farm Tractor with a Trailer in Late Thinning and Cutting in Gaps of Forests. *Forests*. 2022; 13: 1309. – DOI: 10.3390/f13081309.
13. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023; 14: 296. – DOI: 10.3390/f14020296.
14. Labelle E.R., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 2022; 43. – DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
15. Söderberg J., Wallerman J., Almäng A., Möller J., Willén E. Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2021; 36: 1–9. – DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
16. Kemmerer J., Labelle E.R. Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 2021; 140. – DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
17. Gurski A., Ivashko V. Using transport telematics and remote diagnostics to improve vehicle maintenance and repair. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*. 2020; 65: 375–383. – DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
18. Сиваков В.В., Заикин А.Н., Грядунов С.С., Никитин В.В. Совершенствование управления сервисным обслуживанием сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2025. – Т. 29. – № 1. – С. 172–186. – DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-172-186.
19. Сиваков В.В. Цифровизация управления системой технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники // *Хвойные бореальной зоны*. – 2024. – Т. 42. – № 1. – С. 64–71. – DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71.
20. Terinov N., Toybich V., Gertz E., Mekhrentsev A., Azarenok V., Kazantsev P. Modernization of mini-tractor for wood skidding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 875: 012086. – DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012086.
21. Gerts E., Mekhrentsev A., Terinov N., Urazova A. Substantiation of the Technological Process Parameters of Wood Skidding with a Mini Tractor in Increment Thinning. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2022; (6): 126–138. – DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-126-138.
22. Visser R., Leslie C. Productivity of a winch-assisted forwarder and processor: A case study in the Hawkes Bay region. – 2021.
23. Proto A.R., Macri G., Visser R., Russo D., Zimbalatti G. Comparison of Timber Extraction Productivity between Winch and Grapple Skidding: A Case Study in Southern Italian Forests. *Forests*. 2018; 9: 61. – DOI: 10.3390/f9020061.
24. Заикин А.Н., Сиваков В.В. Навесная трелёвочная тележка // Патент № 2785391 С1 Российская Федерация. – № 2022107784. – Заявл. 24.03.2022. – Оpubл. 07.12.2022.

References

1. Marra E., Laschi A., Fabiano F. et al. Impacts of wood extraction on soil: assessing rutting and soil compaction caused by skidding and forwarding by means of traditional and innovative methods. *European Journal of Forest Research*. 2022;141:1-16. DOI: 10.1007/s10342-021-01420-w.

2. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L. et al. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*. 2022;8:3-25. DOI: 10.1007/s40725-021-00155-6.
3. Borz S.A., Mariş A.C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023;14(2):265. DOI: 10.3390/f14020265.
4. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023;14(2):296. DOI: 10.3390/f14020296.
5. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*. 2015;338:124-138.
6. Solgi A., Najafi A., Page-Dumroese D.S., Zenner E.K. Assessment of topsoil disturbance caused by different skidding machine types beyond the margins of the machine operating trail. *Geoderma*. 2020;367:114238.
7. Szweczyk K., Iwanicki P. Evaluating the suitability of machinery use during skidding of wood in pine stands. *Forest Research Papers*. 2019;80:219-226. DOI: 10.2478/frp-2019-0020.
8. Handžić S., Đukić M., Petković V., Marčeta D. Productivity of TIMBERJACK 240A and LKT 81T Skidders at Selective Cutting and Longer Distances. *South-east European forestry*. 2024;15. DOI: 10.15177/seefor.24-08.
9. Kulak D., Stańczykiewicz A., Szweczyk G. Productivity and Time Consumption of Timber Extraction with a Grapple Skidder in Selected Pine Stands. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017;38:55-63.
10. Borz S., Mariş A.-C., Kaakkurivaara N. Performance of Skidding Operations in Low-Access and Low-Intensity Timber Removals: A Simulation of Productivity and Fuel Consumption in Mature Forests. *Forests*. 2023;14:265. DOI: 10.3390/f14020265.
11. Visser R., Spinelli R. Assessment of a winch-assisted skidder in Castle Downs Forest, New Zealand. 2020.
12. Dudek T., Janas D. The Productivity and the Costs Forwarding Wood of a Farm Tractor with a Trailer in Late Thinning and Cutting in Gaps of Forests. *Forests*. 2022;13:1309. DOI: 10.3390/f13081309.
13. Visser R., Spinelli R. Benefits and Limitations of Winch-Assist Technology for Skidding Operations. *Forests*. 2023;14:296. DOI: 10.3390/f14020296.
14. Labelle E.R., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 2022;43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
15. Söderberg J., Wallerman J., Almäng A., Möller J., Willén E. Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2021;36:1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
16. Kemmerer J., Labelle E.R. Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 2021;140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
17. Gurski A., Ivashko V. Using transport telematics and remote diagnostics to improve vehicle maintenance and repair. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*. 2020;65:375-383. DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
18. Sivakov V.V., Zaikin A.N., Gryadunov S.S., Nikitin V.V. Sovvershenstvovanie upravleniya servisnym obsluzhivaniem sel'skokhozyaystvennoy i lesozagotovitel'noy tekhniki. [Improving service management of agricultural and logging machinery]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2025;29(1):172-186. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-172-186.
19. Sivakov V.V. Tsifrovizatsiya upravleniya sistemoy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lesozagotovitel'noy tekhniki. [Digitalization of the maintenance and repair system management of logging machinery]. *Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the boreal zone*. 2024;42(1):64-71. (In Russ.). DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71.
20. Terinov N., Toybich V., Gertz E., Mekhrentsev A., Azarenok V., Kazantsev P. Modernization of mini-tractor for wood skidding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;875:012086. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012086.
21. Gerts E., Mekhrentsev A., Terinov N., Urazova A. Substantiation of the Technological Process Parameters of Wood Skidding with a Mini Tractor in Increment Thinning. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2022;(6):126-138. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-126-138. (In Russ.)
22. Visser R., Leslie C. Productivity of a winch-assisted forwarder and processor: A case study in the Hawkes Bay region. 2021.
23. Proto A.R., Macri G., Visser R., Russo D., Zimbalatti G. Comparison of Timber Extraction Productivity between Winch and Grapple Skidding: A Case Study in Southern Italian Forests. *Forests*. 2018;9:61. DOI: 10.3390/f9020061.

24. Zaikin A.N., Sivakov V.V. Navesnaya trelevochnaya telezhka. [Mounted skidding cart]. Patent № 2785391 C1 Rossiyskaya Federatsiya. № 2022107784; zayavl. 24.03.2022; opubl. 07.12.2022. (In Russ.)

Сведения об авторах

Сиваков Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: sv@bgtu.ru.

Заикин Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru.

✉ *Зеликов Владимир Анатольевич* – доктор технических наук, доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Information about the authors

Vladimir V. Sivakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: sv@bgtu.ru.

Anatolii N. Zaikin – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru.

✉ *Vladimir A. Zelikov* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author



Моделирование процесса образования колеи при последовательном взаимодействии колес форвардера с твердыми препятствиями на трелевочном волоке с учетом влажности почвогрунта

Владимир Я. Шапиро¹, shapiro54vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Игорь В. Григорьев², silver73@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Евгений В. Сибиряткин², jey-sib@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Павел Н. Перфильев⁵, savadf0706@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

⁵ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Представлена математическая модель образования колеи при последовательном взаимодействии колёсных пар форвардера с твёрдыми препятствиями (пеньями, камнями) на трелёвочном волоке с учётом влажности почвогрунта. Модель базируется на законах сохранения энергии, контактной механике и критерии сдвигового разрушения грунта Кулона – Мора. Установлено, что динамическое давление на почвогрунт при наезде колеса на препятствие может в 2 и более раза превышать статическое давление. На основе натурных обследований трелёвочного волока в сосняке-брусничнике выявлено, что глубина деформаций после твёрдых препятствий больше в сторону грузового хода форвардера, а образовавшаяся колея типа «гребенка» приводит к повышенному расходу топлива, росту динамических нагрузок и снижению комфорта оператора. Показано, что высота препятствия и влажность почвогрунта являются критическими факторами: при влажности выше предела пластичности суглинка ($W > 28-30\%$) и высоте препятствия $h \geq 0,3$ м для трёхосного форвардера относительная глубина колеи достигает $\lambda = 1,3$, что соответствует касанию днищем поверхности грунта и потере проходимости. Предложены и количественно обоснованы технические мероприятия по снижению глубины колеи: оснащение колёсных пар гибкими гусеничными лентами (моногоусеницами) и оптимизация нагрузки на оси. Для четырёхосного форвардера установка моногоусениц позволяет осуществлять трелёвку на влажных грунтах с препятствиями высотой до 0,4 м без снижения грузоподъёмности. Разработанный подход позволяет прогнозировать глубину колеи для заданных геотехнических условий и обоснованно применять меры по снижению динамических нагрузок с сохранением паспортной производительности машин.

Ключевые слова: форвардер, трелёвочный волок, динамическое давление, препятствие, влажность почвогрунта, математическое моделирование, проходимость

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

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 процесса образования колеи при последовательном взаимодействии колес форвардера с твердыми препятствиями на трелевочном волоке с учетом влажности почвогрунта / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Е. В. Сибиряткин, Е. А. Тихонов, П. Н. Перфильев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 234–246. – Библиогр.: с. 243–245 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/15>.

Поступила 20.01.2026 Пересмотрена 23.03.2026 Принята 15.05.2026 Опубликовано онлайн 26.06.2026

Modeling the process of rut formation during sequential interaction of forwarder wheels with solid obstacles on a skid trail taking into account soil moisture

Vladimir Ya. Shapiro¹, shapiro54vlad@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Igor V. Grigorev², silver73@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Evgeny V. Sibiryatkin², jey-sib@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tihonov@petrsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Pavel N. Perfiliev⁵, savadf0706@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

² Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation

³ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

⁵ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

A mathematical model of rut formation during sequential interaction of forwarder wheel sets with solid obstacles (stumps, stones) on a skidding trail is presented, taking into account soil moisture. The model is based on the laws of energy conservation, contact mechanics, and the Mohr–Coulomb shear failure criterion of soil. It has been established that the dynamic pressure on the soil when a wheel hits an obstacle can be 2 or more times higher than the static pressure. Based on field surveys of a skidding trail in a cowberry pine forest, it was revealed that the depth of deformations after solid obstacles is greater towards the loaded travel direction of the forwarder, and the resulting “comb” type rut leads to increased fuel consumption, increased dynamic loads, and reduced operator comfort. It is shown that obstacle height and soil moisture are critical factors: at moisture content above the plasticity limit of loam ($W > 28\text{--}30\%$) and obstacle height $h \geq 0.3$ m for a three-axle forwarder, the relative rut depth reaches $\lambda = 1.3$, which corresponds to the bottom contacting the ground surface and loss of trafficability. Technical measures to reduce rut depth are proposed and quantitatively substantiated: equipping wheel sets with flexible track belts (single-track wheels) and optimizing axle load. For a four-axle forwarder, the installation of single-track wheels allows skidding on wet soils with obstacles up to 0.4 m high without reducing load capacity. The developed approach makes it possible to predict rut depth for given geotechnical conditions and to reasonably apply measures to reduce dynamic loads while maintaining the rated productivity of the machines.

Keywords: forwarder, skidding trail, dynamic pressure, obstacle, soil moisture, mathematical modeling, trafficability

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

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: Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Sibiryatkin E. V., Tikhonov E. A., Perfiliev P. N. (2026) Modeling the process of rut formation during sequential interaction of forwarder wheels with solid obstacles on a skid trail taking into account soil moisture. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 234–246 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/15>.

Received 20.01.2026.

Revised 23.03. 2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и экологической безопасности трелёвочных работ в условиях, когда эксплуатация форвардеров происходит на переувлажнённых почвогрунтах с

наличием твёрдых препятствий. Подход к анализу динамических режимов взаимодействия колеса с препятствием недавно был предложен в робототехнике. В частности, Zheng и др. [1] вводят параметр $S_c = H_{\max_o}/R$ – отношение максимальной преодолеваемой высоты препятствия к радиусу

колеса, а для оценки контактных усилий используют баланс потенциальной энергии при перепаде высоты. Авторы показывают, что пассивно-трансформируемые колёса позволяют достичь $S_c \approx 2,5$, тогда как обычные колёса ограничены $S_c \approx 1$. По аналогии в настоящей работе предлагается модифицированный критерий $\lambda = H / H_{\text{кл}}$ (отношение глубины колеи к клиренсу форвардера) и связать его с энергией ударного взаимодействия.

В настоящее время подавляющий объём заготовленной древесины в России вытревливается на погрузочные пункты форвардерами, практически 100 % которых имеют колёсный движитель [2]. На их производительность первоочередное влияние оказывают расстояние трелёвки и проходимость, зависящая от состояния поверхности движения. На территории лесного фонда РФ преобладают почвогрунты III и IV категории, которые в тёплый период года существенно теряют несущую способность из-за переувлажнения. Более того, процессы потепления климата привели к значительному сокращению периода устойчивой зимней вывозки, что вынуждает проводить трелёвку в сложных почвенно-грунтовых условиях [2].

Как отмечается в работе [3], реологические свойства грунтов (вязкость, ползучесть, релаксация) играют ключевую роль в формировании колеи при длительном и циклическом нагружении. Классические уравнения тягового баланса, принятые из теории автомобилей общего назначения, не учитывают сопротивление повороту, что приводит к погрешностям при оценке нагрузок на движитель, особенно при движении по переувлажнённым грунтам с твёрдыми включениями. При трелёвке пачки древесины трактор может до 70 % времени движения находиться в режиме поворота с разными радиусами кривизны [8]. Это создаёт дополнительные динамические воздействия при наезде на твёрдые препятствия, которые в существующих моделях колееобразования, как правило, не учитываются.

Полевые исследования Пискунова [4] показали, что состояние волока по его длине существенно варьируется: выделено 8 типов участков, включая участки с пнём в месте прохода колеса и участки, расположенные сразу за пнём. Автор приходит к выводу, что для описания взаимодействия движителя с почвогрунтом на всём протяжении волока необходим набор моделей [4]. Этот вывод непосредственно подтверждает актуальность нашей работы: наличие твёрдых препятствий (пней) и следующих за ними локальных деформаций («гребёнка») требует отхода от однородных моделей и учёта ударного и

последовательного характера нагружения при проходе нескольких колёсных пар форвардера.

Модернизация технологического оборудования лесных машин, включая харвестеры [5], позволяет повысить их эффективность, однако для форвардеров, движущихся по трелёвочным волокам, остаются нерешёнными вопросы прогнозирования колеи при наличии твёрдых включений. Значительная часть лесосечного фонда расположена на грунтах со слабой несущей способностью, что создаёт серьёзные проблемы при выполнении трелёвочных работ [6]. В таких условиях возникает глубокое колееобразование, буксование движителя и снижение производительности.

При движении лесных машин по неровной поверхности неизбежно возникают соударения элементов ходовой части с опорным основанием [7]. Наезд колеса на пень или камень создаёт ударное воздействие, которое может в 2 и более раза превышать статическое давление на почвогрунт. Степень уплотнения лесной почвы от воздействия движителей форвардера напрямую влияет как на расход топлива, так и на последующее лесовосстановление [8]. Особую опасность представляет многократное движение машины по одному и тому же следу, которое при наличии твёрдых включений приводит к глубокой необратимой колее, разрушающей почвенный профиль. Кроме того, в трансмиссии сочленённых машин возникает циркуляция мощности, достигающая 50–60 % от номинальной, что приводит к дополнительным энергозатратам и повышенному буксованию колёс [8].

Для оценки эффективности лесных машин в сложных условиях всё чаще применяются методы имитационного моделирования, позволяющие учесть такие факторы, как расстояние трелёвки и загрузка оборудования [9]. Однако существующие модели, как правило, не учитывают ударное воздействие колёс на твёрдые препятствия. При проведении выборочных рубок оставляемые деревья становятся существенным препятствием для движения лесозаготовительной техники: оператор харвестера вынужден совершать дополнительные манёвры, что увеличивает общий пробег машины и время цикла [10]. Аналогичная ситуация наблюдается при движении форвардера по волоку, где препятствиями служат пни и камни.

Международные исследования подтверждают значимость рассматриваемой проблемы. Bumber и др. [11] разработали модель движения форвардера на подъём, учитывающую перераспределение нагрузки между осями при преодолении препятствий. Zemánek и Neruda [12]

в полевых испытаниях показали, что максимальные фактические давления шины могут превышать расчётные статические на 203 %, что доказывает необходимость учёта динамической составляющей. Uusitalo и др. [13] установили, что влажность почвы и число проходов являются главными предикторами глубины колеи на мелкозернистых минеральных грунтах. Pandur и др. [14] экспериментально показали, что с каждым проходом форвардера глубина колеи возрастает нелинейно, и после 8–10 проходов на слабых грунтах машина практически теряет подвижность.

Современные методы машинного обучения открывают новые возможности для прогнозирования колееобразования [15], однако они требуют обширных обучающих выборок и не всегда учитывают физику ударного взаимодействия. Общие закономерности уплотнения почв при многократных проходах колёсных движителей подробно рассмотрены в обзоре Shaheb, Venkatesh и Shearer [16]. Комплексный анализ стратегий снижения ущерба почве от лесных машин представлен Labelle и др. [17], где отмечается, что для адекватного прогнозирования необходимы модели, учитывающие динамические пиковые нагрузки. Дымов и др. [18] на примере средней тайги Республики Коми показали, что даже после однократного прохода колёсной техники изменения свойств почвы сохраняются в течение длительного времени. Grube и др. [19] предложили использовать расстояние до пня в качестве предиктора деформации почвы, что напрямую подтверждает значимость учёта расположения пней при моделировании колеи.

Современные исследования в области лесного машиностроения всё чаще опираются на методы имитационного и математического моделирования, позволяющие учитывать большое количество природно-производственных факторов без проведения натурных экспериментов. В частности, разработаны модели, воспроизводящие работу харвестера с учётом случайного расположения деревьев и наличия препятствий, что позволяет оптимизировать траектории движения [20]. Однако для форвардеров, движущихся по трелёвочным волокам, аналогичные модели, учитывающие локальные препятствия в виде пней и камней, а также динамический характер нагружения при наезде на них, отсутствуют.

Цель работы – разработка математической модели образования колеи при последовательном взаимодействии колёсных пар форвардера с твёрдыми препятствиями на трелёвочном волокне с учётом влажности почвогрунта. Модель должна позволять количественно оценивать динамическую составляющую нагрузки, прогнозировать глубину

колеи после прохода каждой колёсной пары и обосновывать технические решения (применение колёсных моногусениц, оптимизацию нагрузки по осям) для сохранения производительности машин в сложных геотехнических условиях. В отличие от существующих статических моделей, в данной работе учитывается ударный характер нагружения при наезде на препятствие, а также последовательный (многопроходный) характер деформации почвогрунта. Разработанная модель может быть использована для обоснования допустимых нагрузок на оси форвардера при проектировании технологических карт разработки лесосек на переувлажнённых грунтах с наличием пней.

Материалы и методы

Натурное обследование

Натурное обследование трелевочного волокна проводилось в сосняке-брусничнике на лесосеке, разработанной по скандинавской технологии. Исследование показало, что глубины деформаций после твердых препятствий в колее больше в сторону грузового хода форвардеров (рисунок 4). Результаты натурного обследования поверхности колеи трелевочного волокна представлены на рисунке 1.

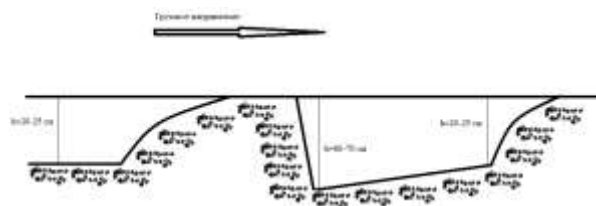


Рисунок 1. Результаты натурного обследования поверхности колеи трелевочного волокна в сосняке-брусничнике

Figure 1. Results of a full-scale survey of the track surface of a skidding portage in a cowberry pine forest
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Также результаты натурного обследования колеи волокна показали, что после глубокой просадки движителя при сходе с твердого препятствия поверхность колеи плавно поднимается и выходит на уровень, характерный для нормального (безударного) деформирования поверхности.

Результатом образования колеи «гребенки» являются: повышенный расход топлива, связанный с необходимостью заезда на образовавшиеся случайным образом в колее препятствия; повышенные динамические нагрузки на раму и подвеску лесной машины; снижение комфорта работы оператора; обрывы корней, оставляемых на дораскивание деревьев при выборочных рубках.

Математическая модель

Пусть груженная колесная лесная машина (форвардер) общим весом Q воздействует на краевую часть массива почвогрунта, содержащую некоторое препятствие (пень, камень и т.п.) высотой h . Груз весом Q и массой M при падении с высоты h оказывает силовое воздействие F на почвогрунт, которое за единицу времени t формирует импульс массы $I_m = MV$, где V – динамическая скорость взаимодействия.

Из закона сохранения потенциальной и кинетической энергий определим скорость:

$$V = \sqrt{2gh},$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила F , отнесенная к площади S пятна контакта шины с почвогрунтом, оказывает на него вертикальное динамическое давление p , равное:

$$p = \frac{Q\sqrt{2gh}}{S}, \quad (1)$$

которое приводит к образованию зоны разрушения краевой части массива почвогрунта и колеи в нем глубиной h_k .

Таким образом, динамическое давление p по сравнению с его статическим значением $p_c = Q/S$, наблюдаемым при отсутствии препятствий, возрастает пропорционально функциональному коэффициенту $\sqrt{2gh}$. Безразмерная величина p/p_c представляет собой коэффициент динамического усиления воздействия на краевую часть массива почвогрунта в пределах трелевочного волокна. Как показали расчеты, указанное усиление достигает 2-х кратных и более значений.

Исследование процесса образования колеи глубиной h_k представляет собой решение задачи контактного разрушения массива почвогрунта механизмом сдвига, подробно рассмотренной при использовании различных инденторов при статических и динамических нагрузках на массив сплошной среды [11–13].

Величина динамического давления сдвига q связана с вертикальным давлением p соотношением:

$$q = \gamma p = \frac{\nu}{1-\nu} p, \quad (2)$$

где γ – коэффициент бокового расширения, ν – коэффициент Пуассона.

Центр Отрехмерной системы координат Ox_1 поместим в центр пятна контакта взаимодействия индентора (шины лесной машины) с массивом почвогрунта и направим ось Oz вертикально вниз в направлении глубины колеи.

Величина давления сдвига q_z зависит от координаты z и снижается с ростом последней по степенному закону:

$$q_z = \frac{q}{(z/a)^n}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{QR(1-\nu^2)}{4E}}, \quad n = 1 - \frac{\gamma}{2}, \quad (3)$$

где a – радиус зоны контактного сближения круглого индентора радиусом R в пределах пятна контакта при его ударном взаимодействии с почвогрунтом, упругопластические свойства которого характеризуются модулем общей деформации E и коэффициентом Пуассона ν [11].

Максимальная глубина z , на которой выполняется критерий разрушения почвогрунта сдвигом, а именно $q_z \geq \tau$, где τ – величина предела прочности почвогрунта на сдвиг, принимается за глубину колеи h_k .

Величину τ , следуя положениям стандарта [14], определим с помощью соотношения:

$$\tau = C + p \tan \varphi, \quad (4)$$

в которое входят параметры паспорта прочности почвогрунта: C – величина его удельного сцепления и φ – угол внутреннего трения.

Установленные соотношения (1)–(4) позволяют определить величину h_k в виде:

$$h_k = a \left[\frac{\gamma p}{\tau} \right]^{1/n}. \quad (5)$$

В итоге с учетом исходной высоты h препятствия в результате ударного взаимодействия лесной машины с почвогрунтом образуется общая глубина колеи $H = h + h_k$, которую будем рассматривать как высоту следующего препятствия при взаимодействии с краевой частью массива очередной колесной пары.

Результаты

Произведем расчеты величины H для следующих геотехнических условий трелевки.

В качестве колесных лесных машин примем два форвардера:

1 - трехосный форвардер АМКОДОР 2662-01 с высотой клиренса $H_{кл}=580$ мм, радиусом передних колес $R=0,41$ м (диаметром 32 дюйма) и задних колес $R=0,33$ м (диаметром 26 дюйма). Максимальная нагрузка на переднюю ось составляет $Q_1=7$ т (общая максимальная нагрузка $Q=14$ т), нагрузка на вторую и третью оси $Q_2=Q_3=3,5$ т, длина пятна контакта $L=0,442$ м, его ширина $B=0,7$ м, $S=0,31$ м²;

2 - четырехосный форвардер АМКОДОР 2682-01 с клиренсом $H_{кл}=540$ мм и радиусом всех четырех пар колес $R=0,33$ м (диаметром 26 дюйма), максимальной нагрузке на все оси

$Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=3,75$ т (общая максимальная нагрузка составляет $Q=15$ т), площадь пятна контакта равна $S=0,31$ м².

В качестве минеральной основы почвогрунта рассмотрим суглинок, влажность которого W , как установлено в работах [15-17], оказывает существенное влияние на его характеристики C , ϕ , E и ν .

В таблице 1 на основании данных [18-20] представлены показатели средних значений C , ϕ , E и ν для четырех состояний (категорий) почвогрунта по критерию его влажности W .

На рисунке 2 для условий эксплуатации трехосного форвардера на почвогрунтах III категории влажности представлен график (линия 1) зависимости абсолютных значений глубины колеи H , м, образованной в результате прохода всех колесных пар с нумерацией $N=1, 2, 3$ (ось абсцисс) при незначительном препятствии высотой $h=0,2$ м.

На этом же рисунке линия 2 отражает полученные значения H в безразмерном виде путем отнесения их к размеру клиренса $H_{кл}$, тем самым введен коэффициент $\lambda=H/H_{кл}$ и установлена его зависимость от номера оси N .

Как видим, даже при полной загрузке форвардера в этих геотехнических условиях трелевки параметр λ не достигает значения 1, т.е. препятствие не является критическим и образованная глубина колеи $H < H_{кл}$.

Однако по мере преодоления трехосным форвардером более крупных препятствий ситуация меняется в негативном направлении.

Так, на рисунке 3 для аналогичных выше геотехнических условий трелевки, представлены прогнозные зависимости $\lambda(N)$ для трех типов препятствий: $h=0,2$ м (линия 1), $h=0,3$ м (линия 2) и $h=0,4$ м (линия 3).

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств почвогрунта

Table 1

Indicators of physical and mechanical properties of the soil

Категория / Category	W , %	Состояние почвогрунта / Soil condition	C , кПа / kPa	ϕ , °	E , кПа / kPa	ν
I	16	сухой / dry	20,3	24,7	3000	0,16
II	24	увлажненный / moist	15,1	21,4	1000	0,24
III	32	влажный / wet	10,9	17,5	700	0,32

IV	41	переувлажненный / waterlogged	6,5	13,3	400	0,41

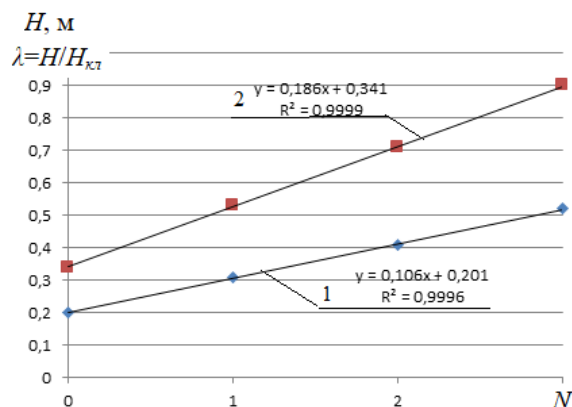


Рисунок 2. Увеличение глубины колеи по мере взаимодействия колесных пар форвардера с препятствием:

1 – H , м; 2 – $\lambda=H/H_{кл}$

Figure 2. Increasing track depth as the forwarder's wheelsets interact with an obstacle

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

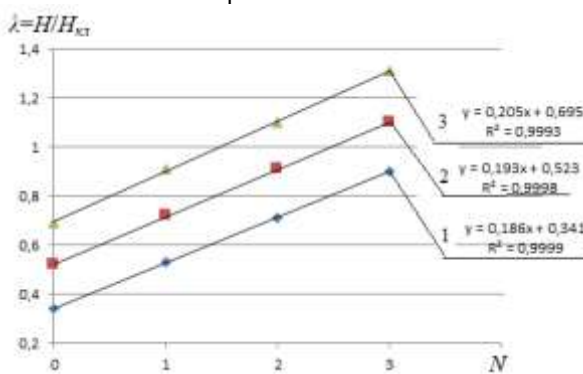


Рисунок 3. Влияние высоты препятствия на глубину образованной колеи:

1 - $h=0,2$ м; 2 - $h=0,3$ м; 3 - $h=0,4$ м

Figure 3. The effect of obstacle height on the depth of the formed track

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Полученные линейные зависимости наглядно показывают тенденции углубления колеи с ростом высоты препятствия по мере его преодоления всеми колесными парами трехосного форвардера.

Анализ данных рисунка 3 показывает, что уже при значении $h=0,3$ м (линия 2) данное препятствие является критическим для эффективного прохода форвардера с полной загрузкой.

Аналогичный вывод справедливо сделать и для более высокого препятствия с $h=0,4$ м, однако

проблемы его преодоления возникают уже после прохода первой колесной пары.

Таким образом, высота препятствия действительно является существенным фактором, влияющим на процесс трелевки и эффективного продвижения колесной лесной машины по заданной трассе.

Состояние влажности почвогрунта (таблица 1) во многом определяет его несущую способность и, следовательно, развитие процесса образования колеи.

На рисунке 4 на примере преодоления форвардером АМКОДОР 2662-01 препятствия высотой $h=0,3$ м видно, что зависимость λ от влажности W , %, с высокой степенью детерминации подчиняется возрастающему экспоненциальному закону.

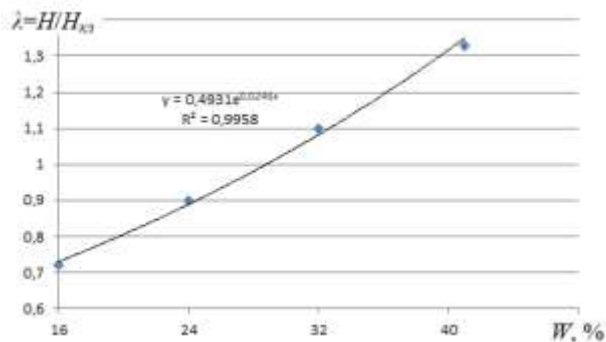


Рисунок 4. Влияние влажности почвогрунта на глубину колеи

Figure 4. Effect of soil moisture on track depth

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Отметим, что предел пластичности суглинка составляет примерно $W_{п}=28-30\%$, а предел текучести - $W_{т}=40-43\%$.

Из данных рисунка 7 следует, что при состоянии $W \leq W_{п}$ глубина колеи не превышает размера клиренса ($\lambda \leq 1$).

При трелевке в сложных условиях по влажным почвогрунтам с показателем $W > 30\%$ глубина колеи превышает размер клиренса.

Прогноз образования колеи при $W \rightarrow W_{т}$ является крайне неблагоприятным, поскольку величина λ достигает уровня 1,3, т.е. форвардер может погрузиться в переувлажненный почвогрунт на глубину, превышающую клиренс $H_{кл}$ на 30%.

Обратимся к рисунку 5 (линия 3), отражающему условия прохождения форвардером с полной загрузкой $Q=14$ т участка влажного почвогрунта со значительным препятствием высотой $h=0,4$ м.

Первая колесная пара при ударном взаимодействии с участком почвогрунта обусловила образование колеи глубиной до 90% от размера

клиренса. Дальнейшее движение форвардера будет затруднено, поскольку его днище достигнет поверхности почвогрунта.

Это обстоятельство требует реализации определенных технических мероприятий по снижению динамических ударных нагрузок на краевую часть массива почвогрунта в пределах трелевочного волокна.

Как показали расчеты (рисунок 5), оснащение второй и третьей колесных пар гибкими гусеничными лентами (моногоусеницами), позволяет практически в 2,5 раза увеличить длину и соответственно площадь пятна контакта.

Следствием этого является снижение уровня динамического давления на почвогрунт и параметра относительной глубины колеи λ от взаимодействия со второй колесной парой на 8% (линия 2) и с третьей парой на 27% по сравнению с исходной зависимостью λ от N при отсутствии гусениц.

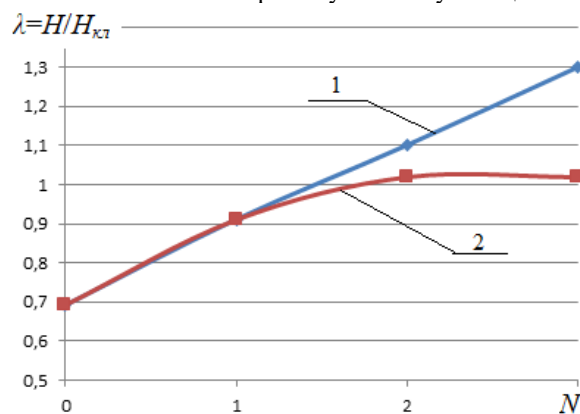


Рисунок 5. Изменение относительной глубины колеи при реализации мероприятий по снижению нагрузки на почвогрунт для трехосного форвардера
Figure 5. Changes in the relative depth of the track during the implementation of measures to reduce the load on the soil for a three-axis forwarder

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Однако при оснащении колесных пар четырехосного форвардера колесными моногоусеницами ситуация меняется на противоположную по сравнению с эксплуатацией трехосного форвардера. В этом случае удастся кардинально улучшить условия трелевки без снижения максимальной загрузки при достижении глубины колеи, обеспечивающей полный проход груженной лесной машины по почвогрунтам различной влажности, содержащим препятствия высотой до 0,4 м.

Обсуждение

Как видно из анализа данных рисунка 8 реализация данного технического решения

позволяет существенно улучшить условия трелевки с достижением показателя $\lambda \approx 1$ без снижения максимальной загрузки форвардера.

При этом дополнительное снижение веса с 14 до 10 т обеспечивает уменьшение относительной глубины колеи на 10% - с уровня $\lambda=1,02$ до $\lambda=0,93$, что позволяет сделать вывод о том, что преодоление данного препятствия форвардером не является критическим.

Таким образом, оснащение 2х и 3х колесных пар колесными моногусеницами в сочетании с определенным снижением общей загрузки форвардера совместно обеспечивают существенное снижение глубины образованной колеи (до 40%) от прогнозного максимального уровня значения индикативного параметра $\lambda=1,3$.

Еще одним эффективным техническим решением является использование достаточно широко распространенных на импортных лесных машинах, например, колесных лесных машинах компании Понссе, несбалансированных tandemных тележек [6]. Такое техническое решение, во-первых позволяет упростить данный узел, сделать надежнее, легче, и дешевле, во-вторых, узел такой конструкции повышает проходимость машины, за счет того, что при преодолении препятствия, первое колесо tandemа не давит на почвогрунт, до момента схода с препятствия заднего колеса tandemа. А это означает, что машина всегда имеет максимально возможную опорную площадь, и, соответственно, минимальное давление на почвогрунт. В рассматриваемой ситуации несбалансированная tandemная тележка (задняя у трехосного форвардера, передняя и задняя у четырехосного) ударит по дну колеи при сходе с твердого препятствия, но ударит сразу колесной парой. За счет чего площадь ударной нагрузки увеличится.

Несбалансированные tandemные тележки позволяют колесным лесным машинам «идти по верху» на слабонесущих почвогрунтах, не зарываясь в них. Но они хуже работают в условиях склонов.

Следует признать, что предложенные решения являются эффективными и наиболее предпочтительными при осуществлении трелевочных работ в данных геотехнических условиях, содержащих вдоль трассы движения значительные по высоте твердые препятствия.

Рассмотрим условия использования четырехосного форвардера АМКОДОР 2682-01 с клиренсом $H_{кл}=540$ мм при максимальной загрузке $Q=15$ т и ее равномерном распределении на все оси.

На рисунке 6 по аналогии с рисунком 8 исследовано влияние цикличности проходов осей N колесных пар (ось абсцисс) на параметр относительной глубины колеи λ (ось ординат) при

использовании обычных шин (линия 1) и колесных моногусениц (линия 2) на колесные пары 1-2 и 3-4 осей. Высота препятствия составляет $h=0,4$ м.

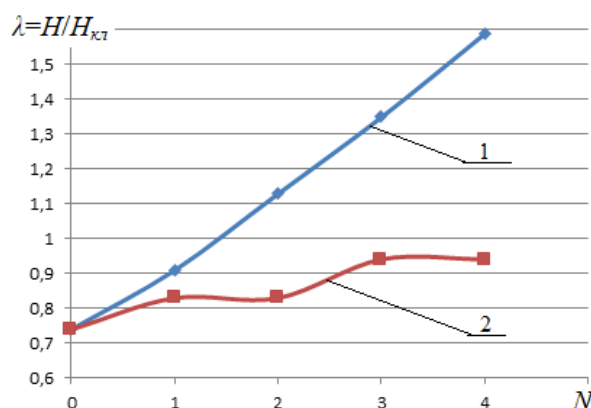


Рисунок 6. Изменение относительной глубины колеи при реализации мероприятий по снижению нагрузки на почвогрунт для четырехосного форвардера

Figure 6. Changes in the relative depth of the track during the implementation of measures to reduce the load on the soil for a four-axle forwarder

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Сравнительный анализ данных рисунков 8 и 9 позволяет сделать ряд выводов.

Во-первых, линии 1 на обоих рисунках практически идентичны. Отличие состоит в прогнозе глубины образованной колеи при полном проходе препятствия: для трехосного форвардера предельная величина $\lambda=1,3$, а для четырехосного - $\lambda=1,6$.

В обоих случаях данное препятствие следует признать критическим при полной загрузке обоих форвардеров.

Во-вторых, линии 2 на обоих рисунках свидетельствуют о том, что за счет оснащения колесных пар колесными моногусеницами четырехосный форвардер обеспечивает существенно лучшие конечные показатели процесса образования колеи без необходимости снижения общей загрузки, равной 15 т, тогда как при использовании трехосного форвардера с гусеницами, несмотря на больший клиренс, аналогичный результат достигался при снижении нагрузки с 14 до 10 т.

Исследуем для выбранных форвардеров при их полной загрузке совместное влияние параметров высоты препятствия h и влажности почвогрунта W на показатель относительной глубины колеи λ после прохода всех колесных пар через различные препятствия.

На рисунке 7 при эксплуатации трехосного форвардера с максимальной нагрузкой представлена зависимость λ от h , м, и W , %.

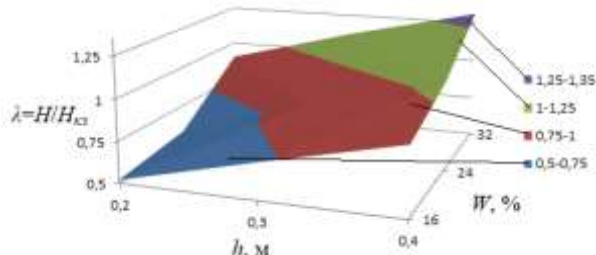


Рисунок 7. Зависимость относительной глубины колеи от высоты препятствия и влажности почвогрунта при эксплуатации трехосного форвардера

Figure 7. Dependence of the relative track depth on the height of the obstacle and soil moisture during operation of a three-axis forwarder

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как видим, в 65-70% возможных значений исходных параметров (аргументов x и y), условия эксплуатации данного форвардера можно считать удовлетворительными, препятствия не являются критическими и снижения его максимальной загрузки и, следовательно, снижения производительности трелевки, не требуется.

По мере роста показателя влажности почвогрунта W до уровня своего предела пластичности ($W \geq 28\%$), а высоты препятствия – до уровней $h \geq 0,35$ м, необходимы вышерассмотренные мероприятия по снижению глубины образованной колеи.

Аналогичные исследования были выполнены для четырехосного форвардера (рисунок 8).

В отличие от условий эксплуатации трехосного форвардера, для четырехосного при использовании обычных шин, за счет большего количества осей и ударного взаимодействия с почвогрунтом, меньшего клиренса наблюдается ограниченная по размерам область (30-35%) сочетания исходных факторов влажности и высоты препятствий, при которых показатель $\lambda \leq 1$. При этом состояние влажности и характеристики почвогрунта соответствуют первым двум категориям (таблица 1). Трелевка по влажным и тем более переувлажненным почвогрунтам является критической.

Иными словами, эксплуатация четырехосного форвардера при наличии на его пути следования препятствий сопряжена с более сложным процессом их преодоления по сравнению с аналогичными условиями для трехосного форвардера.

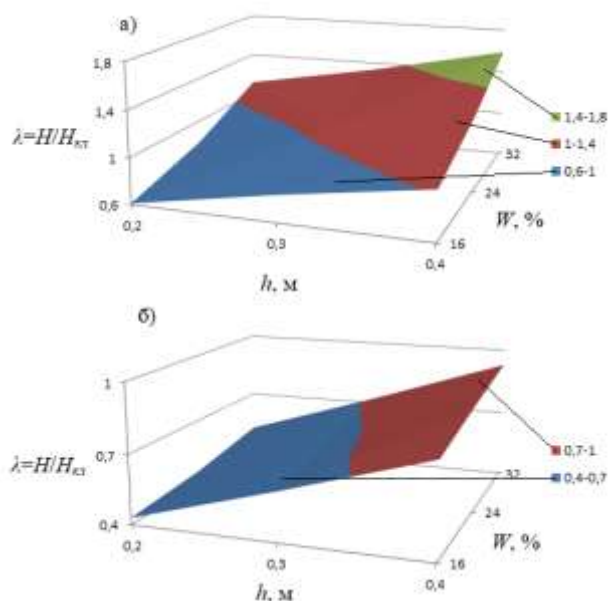


Рисунок 8. Зависимость относительной глубины колеи от высоты препятствия и влажности почвогрунта для четырехосного форвардера при использовании:

а) обычных шин; б) колесных моногусениц

Figure 8. The dependence of the relative track depth on the height of the obstacle and soil moisture for a four-axle forwarder when using: а) conventional tires; б) single-track wheels

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Однако, при оснащении колесных пар четырехосного форвардера колесными моногусеницами, ситуация меняется на противоположную по сравнению с эксплуатацией трехосного форвардера.

В этом случае удастся кардинально улучшить условия трелевки без снижения максимальной загрузки (рисунок 81 б) при достижении глубины колеи, обеспечивающей полный проход груженной лесной машины по почвогрунтам различной влажности, содержащим препятствия высотой до 0,4 м.

Закключение

В результате выполненных исследований разработана математическая модель взаимодействия колесной лесной машины (форвардера) с краевой частью массива почвогрунта, содержащей твердые препятствия в виде пней, камней и других включений. Модель базируется на законах сохранения энергии, контактной механике и критерии сдвигового разрушения грунта (Кулона – Мора). Установлено, что динамическое давление на почвогрунт при

наезде колеса на препятствие может в 2 и более раза превышать статическое давление, что обосновывает необходимость учёта ударного характера нагружения при прогнозировании глубины колеи.

На основе натурных обследований трелевочного волока в сосняке-брусничнике выявлено, что глубина деформаций после твердых препятствий больше в сторону грузового хода форвардера, а после глубокой просадки при сходе с препятствия поверхность колеи плавно поднимается до уровня нормального деформирования. Результатом образования колеи типа «гребенка» являются повышенный расход топлива, рост динамических нагрузок на раму и подвеску, снижение комфорта оператора и повреждение корневых систем оставляемых деревьев.

Показано, что высота препятствия и влажность почвогрунта являются критическими факторами, определяющими глубину колеи. При влажности, превышающей предел пластичности суглинка ($W > 28-30\%$), и высоте препятствия $h \geq 0,3$ м для трехосного форвардера с полной нагрузкой относительная глубина колеи достигает $\lambda = H/H_{\text{кл}} = 1,3$, что соответствует касанию днищем поверхности грунта и потере проходимости. Для четырехосного форвардера на стандартных шинах даже при $h = 0,3$ м и влажности $W > 24\%$ показатель $\lambda > 1$, что делает эксплуатацию невозможной без снижения нагрузки.

Предложены и количественно обоснованы технические мероприятия по снижению глубины колеи. Оснащение колесных пар гибкими гусеничными лентами (моногоусеницами) позволяет увеличить площадь пятна контакта в 2,5 раза и снизить относительную глубину колеи на 8–27% для

разных осей. Комбинация моногоусениц со снижением общей загрузки трехосного форвардера с 14 до 10 т обеспечивает уменьшение λ на 40% — с 1,3 до 0,93. Для четырехосного форвардера установка моногоусениц на все оси позволяет осуществлять трелевку на влажных грунтах с препятствиями высотой до 0,4 м без снижения грузоподъемности.

Установлено, что при эксплуатации трехосного форвардера в 65–70% сочетаний исходных параметров (влажности и высоты препятствий) условия можно считать удовлетворительными, и снижения производительности не требуется. Для четырехосного форвардера область допустимых сочетаний составляет лишь 30–35%, что указывает на его более высокую чувствительность к наличию препятствий.

Разработанный подход и полученные зависимости позволяют на стадии проектирования трелевочных волоков и выбора типа форвардера прогнозировать глубину колеи для заданных геотехнических условий (влажность, высота препятствий) и обоснованно применять меры по снижению динамических нагрузок, сохраняя паспортную производительность машин.

Перспективы дальнейших исследований включают учёт многократных проходов по одному следу (циклическое накопление деформаций); влияние скорости движения форвардера на динамическое давление; разработку инженерной методики назначения предельно допустимой высоты пней для разных типов почв; экспериментальную верификацию модели в натуральных условиях.

Список литературы

1. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion. IEEE Transactions on Robotics. 2023; 39 (2): 941-958. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>.
2. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунева Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 3(381). – С. 101-116. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-101-116>.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа. 1978. – 447 с.
4. Пискунов М.А. Дополнение к типизации исходных условий для исследования процессов взаимодействия движителя форвардера с почвогрунтом // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. 39. – № 4. – С. 307-312.
5. Рукомойников К.П., Царев Е.М., Анисимов С.Е., Татаринцов Д.С., Купцова В.О., Гилязова Т.А. Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевочного механизма лесного харвестера // Известия вузов. Лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 130-138. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138>.
6. Исаченков В.С., Симанович В.А. К вопросу влияния природно-климатических условий на производительность колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2(234). – С. 205-209.
7. Авдеева Е.В., Полетайкин В.Ф., Калинин М.Д. Моделирование работы лесной машины // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. 39. – № 1. – С. 51-54.

8. Гудков В.В., Сокол П.А., Божко А.В., Новикова Т.П., Ребко С.В. Двухосные сочленённые лесотранспортные машины в условиях лесосеки: оценка применимости // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 77-95. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>.
9. Karpachev S., Bykovskiy M. Digital simulation of forest multioperation machine operation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507: 012008. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012008>.
10. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Aleksagina N.N. Simulation Modeling of Labor Costs for Moving of Harvester between Working Positions in Cutting Area. Technical Journal. 2026; 20 (1): 66-72. – DOI: <https://doi.org/10.31803/tg-20241005213728>.
11. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance. Forests. 2023; 14 (1): 103. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>.
12. Zemánek T., Neruda J. Impact on the Operation of a Forwarder with the Wheeled, Tracked-Wheel or Tracked Chassis on the Soil Surface. Forests. 2021; 12 (3): 336. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030336>.
13. Uusitalo J., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Toivio J., Siren M. Predicting rut depth induced by an 8-wheeled forwarder in fine-grained boreal forest soils. Annals of Forest Science. 2020; 77 (2): 42. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00948-y>.
14. Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. iForest – Biogeosciences and Forestry. 2022; 15 (6): 476-483. – DOI: <https://doi.org/10.3832/for4138-015>.
15. Golanbari B., Mardani A., Farhadi N. et al. Applications of machine learning in predicting rut depth in off-road environments. Scientific Reports. 2025; 15: 5486. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90054-8>.
16. Shaheb M.R., Venkatesh R., Shearer S.A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. Journal of Biosystems Engineering. 2021; 46: 417-439. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>.
17. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L. et al. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. Current Forestry Reports. 2022; 8: 20-37. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>.
18. 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 Science. 2022; 55: 1633-1646. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>.
19. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning. Biosystems Engineering. 2025; 258: 104255. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>.
20. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2023. – Т. 27. – № 3. – С. 69-80. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-3-69-80>.

References

1. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*. 2023; 39 (2): 941-958. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>.
2. Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Luneva E.N. Teoreticheskie issledovaniya proizvoditelnosti forvarderov pri ogranicheniyah vozdeystviya na pochvogrunt. [Theoretical Studies of Forwarder Productivity with Limited Impact on Soils]. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2021;3: 101-116. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-101-116>.
3. Vyalov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov. [Rheological foundations of soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola; 1978. 447 p. (In Russ.).
4. Piskunov M.A. Dopolnenie k tipizacii iskhodnykh usloviy dlya issledovaniya processov vzaimodeystviya dvizhitelya forvardera s pochvogruntom. [Addition to the classification of initial conditions for the modelling of the processes of interaction of forwarder wheels with soil]. *Hvoynye borealnoy zony = Conifers of the boreal area*. 2021;39(4): 307-312. (In Russ.).
5. Rukomojnikov K.P., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Tatarinov D.S., Kuptcova V.O., Gilyazova T.A. Modernizaciya valочно-suchkorezno-raskryzhevochnogo mehanizma lesnogo harvester. [Upgrading the Feller-Delimer-Crosscutter Mechanism of a Forest Harvester]. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2022;3: 130-138. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138>.
6. Isachenkov V.S., Simanovich V.A. K voprosu vliyaniya prirodno-klimaticheskikh usloviy na proizvoditelnost kolesnykh trelevochnykh mashin. [To the question of the influence of natural-climatic conditions on the productivity

- of wheeled skidders]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov = Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources.* 2020;2(234): 205-209. (In Russ.).
7. Avdeeva E.V., Poletaykin V.F., Kalinin M.D. Modelirovanie raboty lesnoy mashiny. [Simulation of forestry machine operation]. *Hvoynye borealnoy zony = Conifers of the boreal area*. 2021;39(1): 51-54. (In Russ.).
 8. Gudkov V.V., Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rebko S.V. Dvuhosnyye sochlenyonnyye lesotransportnyye mashiny v usloviyakh leseki: ocenka primenimosti. [Biaxial articulated timber vehicles in the conditions of a cutting: assessment of applicability]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2022;12(4): 77-95. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>.
 9. Karpachev S., Bykovskiy M. Digital simulation of forest multioperation machine operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;507: 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012008>.
 10. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Aleksagina N.N. Simulation Modeling of Labor Costs for Moving of Harvester between Working Positions in Cutting Area. *Technical Journal*. 2026;20(1): 66-72. DOI: <https://doi.org/10.31803/tg-20241005213728>.
 11. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance. *Forests*. 2023;14(1): 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>.
 12. Zemánek T., Neruda J. Impact on the Operation of a Forwarder with the Wheeled, Tracked-Wheel or Tracked Chassis on the Soil Surface. *Forests*. 2021;12(3): 336. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030336>.
 13. Uusitalo J., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Toivio J., Siren M. Predicting rut depth induced by an 8-wheeled forwarder in fine-grained boreal forest soils. *Annals of Forest Science*. 2020;77(2): 42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00948-y>.
 14. Pandur Z., Kopssek H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2022;15(6): 476-483. DOI: <https://doi.org/10.3832/for4138-015>.
 15. Golanbari B., Mardani A., Farhadi N., et al. Applications of machine learning in predicting rut depth in off-road environments. *Scientific Reports*. 2025;15: 5486. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90054-8>.
 16. Shaheb M.R., Venkatesh R., Shearer S.A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*. 2021;46: 417-439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>.
 17. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L., et al. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*. 2022;8: 20-37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>.
 18. 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 Science*. 2022;55: 1633-1646. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>.
 19. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning. *Biosystems Engineering*. 2025;258: 104255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>.
 20. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. Imitacionnoe modelirovanie tehnologicheskogo processa zagotovki drevesiny na primere lesnogo harvester. [Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2023;27(3): 69-80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-3-69-80>.

Сведения об авторах

Шapiro Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, 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», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Сибиряткин Евгений Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jei-sib@mail.ru.

Технологии. Машины и оборудование

Тихонов Евгений Андреевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, 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», набережная Северной Двины, д 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.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, Institutsky Lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation, 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, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Evgeniy V. Sibiryatkin* – Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jey-sib@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, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Pavel N. Perfilev – 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, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author



Оценка работоспособности трелевочного волока на склоне с учетом армирующего влияния насыщенного корнями слоя почвогрунта при взаимодействии колесной лесной машины

Владимир Я. Шапиро¹, shapiro54vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Игорь В. Григорьев², silver73@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Ярослав А. Рыжов³, irosmagelav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>

Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Павел Н. Перфильев⁵, savadf0706@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок., д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

⁵ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Во многих субъектах Российской Федерации участки лесного фонда располагаются не только на равнинной местности, но и на склонах гор, сопок, холмисто-грядовых рельефов. Работа лесных машин в таких условиях значительно сложнее, чем на равнине, а сами леса на склонах наиболее чувствительны к негативному воздействию техники. Как и в равнинных лесах, на склонах необходимо проводить рубки, лесохозяйственные работы и противопожарное обустройство, что невозможно без использования специальных лесных машин. В настоящее время в России и в мире преобладают лесные машины на колёсной тракторной базе. Чрезмерное воздействие движителей на лесные почвогрунты на склонах может приводить не только к образованию колеи (как в равнинных лесах), но и к обрушению части склона, что создаёт чрезвычайно опасную ситуацию для персонала и техники. В статье теоретически обоснована необходимость учёта эффекта армирования почвогрунта корнями деревьев при взаимодействии движителя лесной машины с поверхностью движения на склоне. На основе экспериментальных данных установлено, что степень насыщения грунтово-корневого слоя корнями сосны μ достигает 0,65% при среднем диаметре ствола $d=0,3$ м и ширине волока $H=4$ м, а прирост удельного сцепления ΔC составляет до 70 кПа при $\mu=1,0\%$. Показано, что наличие корневой системы ($\mu>0,2\%$) переводит краевую часть массива склона в устойчивое состояние (коэффициент устойчивости $K_u>1$) и позволяет снизить глубину колеи с 0,4 м до нормативных 0,2 м. Глубина колеи обратно пропорциональна среднему диаметру деревьев вблизи волока: при $d=0,25$ м и более формирование колеи не превышает допустимых значений.

Выполненные исследования и оценки повышают надежность прогноза работоспособности трелевочного волока (технологического коридора), а также достоверность прогнозных показателей лесосечных и лесовосстановительных работ в сложных геотехнических условиях на склонах при использовании колёсных лесных машин или трелевочных систем на их базе.

Ключевые слова: трелевочный волок, склон, армирование корнями, устойчивость склона, глубина колеи, колесная лесная машина

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

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: Оценка работоспособности трелевочного волока на склоне с учетом армирующего влияния насыщенного корнями слоя почвогрунта при взаимодействии колесной лесной машины / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Я. А. Рыжов, Е. А. Тихонов, П. Н. Перфильев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 247–257. – Библиогр.: с. 255–256 (19 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/16>.

Поступила 20.01.2026. Пересмотрена 15.03.2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Article

Assessment of the performance of a skid trail on a slope considering the reinforcing effect of a root-saturated soil layer under the interaction of the wheels of a forest machine

Vladimir Ya. Shapiro¹, shapiro54vlad@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

Igor V. Grigorev², silver73@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Yaroslav A. Ryzhov³,  irosmagelav@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tihonov@petrsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Pavel N. Perfiliev⁵, savadf0706@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

² Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation

³ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

⁵ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

In many constituent entities of the Russian Federation, forest fund areas are located not only on flat terrain, but also on slopes of mountains, hills, and hilly-ridge landforms. The operation of forest machines in such conditions is much more difficult than on flat terrain, and forests on slopes are most sensitive to the negative impact of machinery. As in flat forests, logging, forestry work, and fire protection arrangements are necessary on slopes, which is impossible without the use of special forest machines. Currently, wheeled forest machines based on tractor chassis predominate in Russia and worldwide. Excessive impact of propellers on forest soils on slopes can lead not only to rut formation (as in flat forests), but also to slope collapse, which creates an extremely dangerous situation for personnel and equipment. The article theoretically substantiates the need to take into account the effect of soil reinforcement by tree roots when considering the interaction of a forest machine propeller with the movement surface on a slope. Based on experimental data, it has been established that the degree of saturation of the soil-root layer with pine roots μ reaches 0.65% with an average trunk diameter of $d = 0.3$ m and a trail width of $H = 4$ m, and the increase in specific cohesion ΔC reaches up to 70 kPa at $\mu = 1.0\%$. It is shown that the presence of a root system ($\mu > 0.2\%$) transfers the edge part of the slope massif to a stable state (stability coefficient $K_y > 1$) and reduces the rut depth from 0.4 m to the standard value of 0.2 m. The rut depth is inversely proportional to the average diameter of trees near the trail: at $d = 0.25$ m or more, rut formation does not exceed permissible values. The performed research and assessments increase the reliability of predicting the operability of a skidding trail (technological corridor), as well as the reliability of predictive indicators of logging and reforestation works in complex geotechnical conditions on slopes when using wheeled forest machines or skidding systems based on them.

Keywords: *skidding trail, slope, root reinforcement, slope stability, rut depth, wheeled forest machine*

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>.

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: Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Ryzhov Ya. A., Tikhonov E. A., Perfiliev P. N. (2026) Assessment of the performance of a skid trail on a slope considering the reinforcing effect of a root-saturated soil layer under the interaction of the wheels of a forest machine. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 247–257 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/16>.

Received 20.01.2026.

Revised 15.03. 2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Вопросы устойчивости и эффективности работы лесных машин на склонах и в условиях слабонесущих почвогрунтов остаются одними из наиболее актуальных в лесозаготовительной науке [1]. Исследованиям взаимодействия колёсных движителей с опорной поверхностью на склонах посвящены работы, в которых разработаны методики учёта буксования, маневрирования и циклических нагрузок [2, 3]. Применение комбинированных движителей позволяет существенно снизить глубину колеи по сравнению с чисто колёсными [4].

Подход к анализу динамических режимов взаимодействия колеса с препятствием недавно предложен в робототехнике. Вводится параметр $S_c = H_{\max}/R$ – отношение максимальной преодолеваемой высоты препятствия к радиусу колеса, а для оценки контактных усилий используется баланс потенциальной энергии [4]. Показано, что пассивно-трансформируемые колёса позволяют достичь $S_c \approx 2,5$, тогда как обычные колёса ограничены $S_c \approx 1$. По аналогии в настоящей работе предлагается модифицированный критерий $\lambda = H/H_{\text{кл}}$, где H – глубина колеи, а $H_{\text{кл}}$ – клиренс форвардера.

Полевые исследования показывают, что трелёвочный волок неоднороден по длине: выделяется до восьми типов участков, включая участки с пнём в месте прохода колеса и участки, расположенные непосредственно за пнём [5]. Это требует перехода от усреднённых моделей к локальному учёту препятствий.

Моделирование деформации почвогрунта под воздействием лесных машин с использованием методов машинного обучения и учётом близости пней показывает, что расстояние до пня является статистически значимым предиктором глубины колеи [7]. Экспериментально установлено, что многократные проходы форвардера приводят к нелинейному росту глубины колеи, а после 8–10 проходов на слабых грунтах проходимость практически теряется [8].

Влияние корневых систем древесной растительности на устойчивость склонов исследовано в работах, где показано, что армирующий эффект корней может увеличивать несущую способность грунта на 30–50% [9]. Лабораторные исследования подтверждают, что

наличие корневой системы существенно повышает прочность на сдвиг [10].

Теоретический расчёт несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам представлен в работе [11]. Оптимизация шага грунтозацепов гусеничных лесных машин для чувствительных почвогрунтов рассмотрена в исследовании [12]. Разработана методика экспериментальных исследований по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами, позволяющая комплексно оценить воздействие движителя на опорную поверхность [13].

Важным фактором, влияющим на работоспособность трелёвочного волока на склонах в криолитозоне и зоне сезонного промерзания, являются изменения прочностных характеристик грунтов при оттаивании. Как показано в работе [14], в процессе оттаивания дисперсных грунтов происходит резкое снижение сцепления и угла внутреннего трения, что требует учёта нестационарных свойств почвогрунта при многопроходном воздействии колёс лесных машин. Кроме того, взаимодействие колеса с твёрдыми препятствиями (пни, корни, валуны) на трелёвочном волоке сопровождается концентрацией контактных напряжений. В монографии [15] изложены основные подходы к решению контактных задач механики разрушения, которые могут быть адаптированы для оценки предельной глубины колеи при наезде на препятствие с учётом упруго-пластических деформаций грунтового массива.

Интеграция данных CAN-шины для оценки сопротивления качению форвардера в реальных условиях предложена в исследовании [16].

При оценке проходимости форвардера на склонах важным фактором является распределение нагрузки между осями. На примере восьмиколёсного форвардера показано, что при трелёвке в гору с полной нагрузкой (16 т) и уклоне до 68% критической разгрузки передней оси не происходит, однако при уклоне 41% задняя ось достигает предельно допустимой нагрузки по шинам [6]. Минимальный индекс конуса для экологически приемлемой трелёвки составляет 950 кПа, а предельное буксование 25% принято как критерий предотвращения эрозионных процессов на склонах.

Эффект армирования почвогрунта корнями деревьев широко признан в мировой науке как один из ключевых факторов устойчивости склонов и несущей способности грунтовых массивов. В обзорной работе [17] показано, что корневая система увеличивает прочность грунта на сдвиг за счёт комбинированного действия крупных и мелких корней. Классическая модель Ву – Вальдрона описывает это армирование как дополнительное сцепление, добавляемое в критерий прочности Мора – Кулона.

Количественная оценка армирования почвогрунта корнями растений является актуальной задачей в геотехнике и инженерной экологии. На примере трёх видов травянистых растений показано, что корневое армирование зависит не только от плотности корней, но и от их прочности на разрыв [18]. Суммарное корневое армирование от трёх видов повысило коэффициент запаса устойчивости склона с 1,522 до 1,851 (на 21,6%). Армирующий эффект распределён по глубине: наибольшая плотность корней в слое 0–0,5 м, умеренная — в слое 0,5–1,5 м и минимальная — в слое 1,5–2,0 м. Коэффициент запаса устойчивости склона при этом увеличился на 16% [19]. В настоящей работе аналогичный подход реализован для армирования склона корневой системой сосны: вводится параметр μ (степень насыщения грунта корнями) и прирост удельного сцепления ΔC , зависящий от μ .

Цель работы – разработка математической модели образования колеи при последовательном взаимодействии колёсных пар форвардера с твёрдыми препятствиями (пнями, камнями) на трелёвочном волокне с учётом влажности почвогрунта и армирующего влияния корневой системы. В отличие от существующих статических моделей, в данной работе учитывается ударный характер нагружения при наезде на препятствие, эффект буксования, армирующее влияние корневой системы, а также последовательный (многопроходный) характер деформации почвогрунта.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования степени насыщения μ , % корнями сосны грунтово-корневого слоя массива слабых глинистых грунтов с влажностью W , % на границе текучести, показали, что параметр μ зависит от среднестатистических размеров диаметра d , м ствола деревьев и расстояния L , м между ними (таблица 1).

Таблица 1

Влияние диаметра деревьев и расстояния между ними на параметр μ [12]

Table 1

The effect of the diameter of trees and the distance between them on the parameter μ [12]

d, м	Степень насыщенности грунтово-корневого слоя корнями сосны μ , %		
	L=4 м	L=5 м	L=6 м
0,1	0,07	0,05	0,03
0,2	0,30	0,19	0,13
0,3	0,65	0,42	0,29
0,4	1,05	0,67	0,47
0,5	1,22	0,78	0,54

Для наглядности данные таблицы 1 представлены графически (рисунок 1), где отложено расстояние L , м, диаметр d , м, и параметр μ , %.

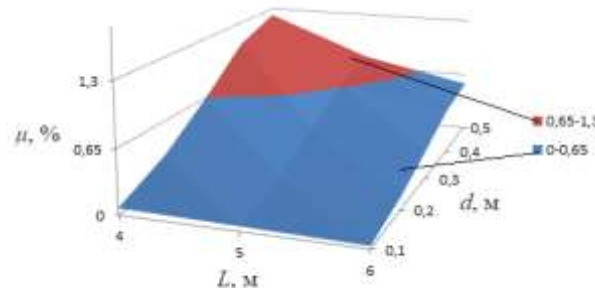


Рисунок 1. График зависимости параметра μ от размеров L и d

Figure 1. Graph of the dependence of the parameter μ on the dimensions L and d

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Как следует из анализа данных таблицы 1 и рисунка 1, применительно к наиболее типовым размерам ширины трелевочного волокна $H=4-5$ м и среднего диаметра деревьев $d=0,1-0,3$ м значения параметра μ не выходят за пределы 0,65%.

Таким образом, при фиксированной ширине трелевочного волокна определяющим параметром армирования почвогрунта корнями деревьев является значение их среднего диаметра.

На рисунке 2 представлены зависимости показателя μ , % от диаметра d , м, при $H=4$ м и $H=5$ м, которые с высокой степенью детерминации описываются функциями прямой.

Как видим, по мере роста среднего диаметра деревьев d прямые расходятся, что позволяет сделать вывод о целесообразности минимизации параметра H с целью более интенсивного армирования слоя почвогрунта в пределах трелевочного волокна или технологического коридора.

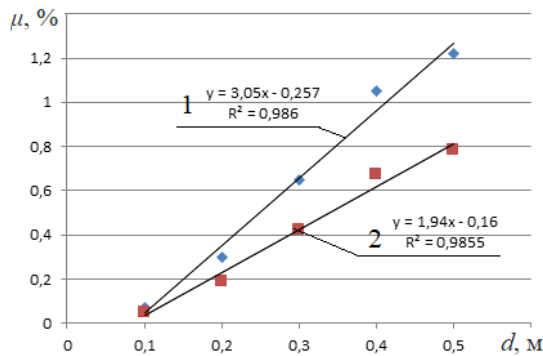


Рисунок 2. Влияние среднего диаметра ствола деревьев на параметр μ :

1 - $H=4$ м; 2 - $H=5$ м

Figure 2. The influence of the average diameter of the tree trunk on the parameter μ :

1 - $H=4$ m; 2 - $H=5$ m

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Армирование почвогрунта корнями деревьев сосны обуславливает, как установлено в ходе экспериментальных исследований [12], прирост величины удельного сцепления ΔC , кПа грунто-корневого слоя краевой части массива (таблица 2).

Таблица 2. Влияние параметра μ на прирост величины удельного сцепления [12]

Table 2. The effect of the parameter μ on the increase in the value of specific adhesion [12]

μ , %	0,05	0,10	0,20	0,50	1,0
ΔC , кПа	3,5	7,0	14,0	35,0	70,0

Данные таблицы 2 представлены графически на рисунке 4.

Если принять во внимание опытные данные [13, 14] по определению параметров паспорта прочности - величины сцепления C , кПа и угла внутреннего трения φ , $^{\circ}$ влагонасыщенных глинистых грунтов с показателем влажности W более 32%, слагающих массив на склоне, то можно заключить, что величина прироста ΔC даже при относительно небольших значениях $\mu=0,1-0,2\%$ соизмерима с базовыми значениями удельного сцепления $C=6-12$ кПа для почвогрунтов, не содержащих какой-либо развитой корневой системы.

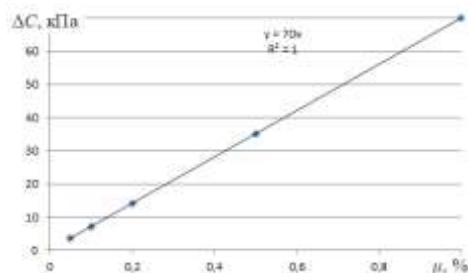


Рисунок 4. Зависимость прироста величины удельного сцепления армированного корнями почвогрунта от параметра μ

Figure 4. Dependence of the increase in the value of the specific adhesion of the root-reinforced soil on the parameter

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

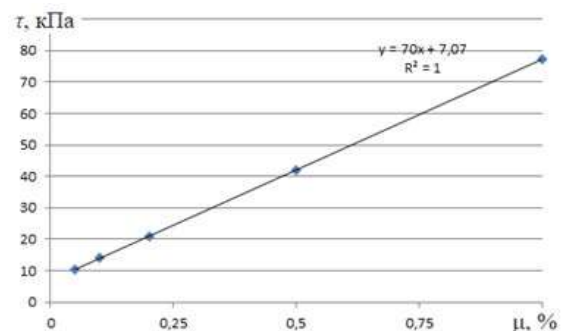
Полученные результаты позволяют в соответствии с положениями стандарта [15] оценить величину предела прочности τ армированного слоя почвогрунта на срез:

$$\tau = C + \Delta C + p \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где $p = \frac{Q}{S} \cos \alpha$ - вертикальное давление на верхний слой почвогрунта, которое оказывает на него груженная с общим весом Q колесная лесная машина в пределах пятна контакта площадью S на склоне с углом наклона α к линии горизонта.

Результаты

Выполнена оценка влияния степени насыщения μ слоя почвогрунта корневой системой сосны на величину предела прочности на срез τ . В качестве почвогрунта принят переувлажнённый суглинок с влажностью W , близкой к пределу текучести $W_t = 40\%$, при которой проявляется эффект солифлюкции, а параметры паспорта прочности снижаются до значений: $C = 4,1$ кПа, $\varphi = 4,25^{\circ}$. В расчётах использованы следующие исходные данные воздействия лесной машины на почвогрунт: $Q = 14$ т, $S = 0,309$ м ^{2} , $\alpha = 20^{\circ}$, $p = 42,58$ кПа.



На рисунке 4 представлен график функции $\tau(\mu)$.

Рисунок 4. График функции $\tau(\mu)$

Figure 4. Graph of the function $\tau(\mu)$

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Линии, изображённые на рисунках 2 и 3, параллельны, имеют одинаковый угловой коэффициент $k = 70$ и отстоят друг от друга на величину 7,07 кПа. Следовательно, увеличение предела прочности на срез тармированного корневой системой слоя почвогрунта обусловлено приростом его удельного сцепления, который зависит от степени насыщения грунтово-корневого слоя корнями деревьев.

Необходимым условием работоспособности трелёвочного волокна или технологического коридора является обеспечение устойчивости краевой части массива склона. В соответствии с положениями [13, 14] введён коэффициент устойчивости K_y , который при отсутствии слоя воды в основании склона определяется соотношением:

$$K_y = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{C + \Delta C}{p \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\tau}{p \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2)$$

Таким образом, устойчивость армированного корнями слоя почвогрунта зависит от трёх параметров: предела прочности на срез τ , величины давления p и угла наклона склона α . При $K_y > 1$ краевая часть массива считается устойчивой, при $K_y < 1$ — неустойчивой. Диапазон значений $1,0 \div 1,1$ соответствует состоянию предельного равновесия массива.

На рисунке 5 (линия 1) приведена зависимость коэффициента устойчивости K_y от степени армирования слоя почвогрунта корнями μ (%). Линия 2 определяет границу состояния предельного равновесия. Исходные данные соответствуют условиям, принятым при определении величины τ .

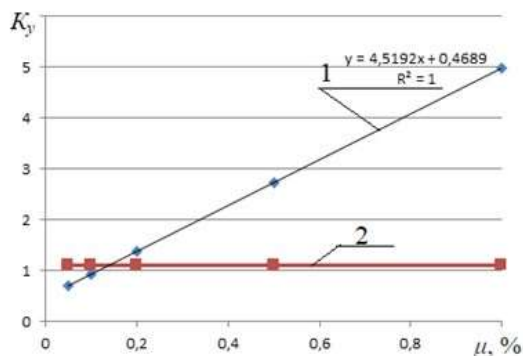


Рисунок 5. Влияние степени армирования верхнего слоя почвогрунта на его устойчивость
Figure 5. The effect of the degree of reinforcement of the upper soil layer on its stability

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Для рассмотренного расчётного случая при $\mu > 0,2\%$ краевая часть массива почвогрунта склона соответствует условиям устойчивости. Даже относительно небольшое присутствие развитой корневой системы деревьев способствует повышению прочности верхнего грунтово-корневого слоя и, следовательно, работоспособности трелёвочного волокна.

Из анализа соотношения (2) следует, что при заданной нагрузке на массив почвогрунта устойчивость его краевой части определяется двумя параметрами – углом наклона склона α и

пределом прочности на срез τ , который в соответствии с данными рисунка 4 зависит от параметра μ и подчиняется функциональной зависимости:

$$\tau = 70\mu + 7,07. \quad (3)$$

Установленное влияние угла наклона склона α (°) на коэффициент устойчивости K_y (рисунок 6) при трёх уровнях насыщения грунтово-корневого слоя почвогрунта корневой системой деревьев – $\mu = 0,05\%$ (линия 1), $\mu = 0,1\%$ (линия 2) и $\mu = 0,2\%$ (линия 3) – позволяет сделать следующие выводы:

- наибольшее снижение K_y наблюдается для пологих и покатых склонов в диапазоне изменения угла α от 10 до 20°, после чего поведение графика $K_y(\mu)$ приближается к асимптотическому затуханию;
- при четырёхкратном увеличении степени армирования слоя почвогрунта корнями от $\mu = 0,05$ до $\mu = 0,2\%$ нижняя граница области устойчивости склона (линия 4) повышается, а допустимый диапазон крутизны склона расширяется от $\alpha = 14$ до 25°.

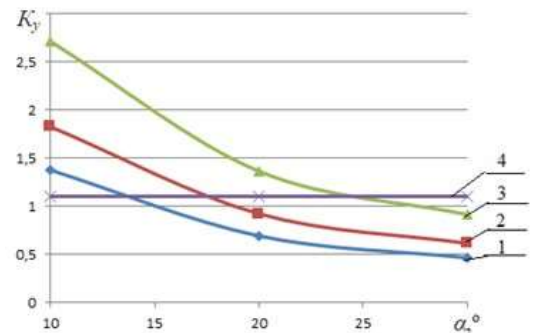


Рисунок 6. Совместное влияние состояния корневой системы и крутизны склона на его устойчивость

1 – $\mu = 0,05\%$; 2 – $\mu = 0,1\%$; 3 – $\mu = 0,2\%$; 4 – нижняя граница области устойчивости склона
Figure 6. The combined effect of the condition of the root system and the steepness of the slope on its stability:

1 – $\mu = 0.05\%$; 2 – $\mu = 0.1\%$; 3 – $\mu = 0.2\%$; 4 – the lower boundary of the slope stability area

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Устойчивость склона является необходимым, но недостаточным условием обеспечения работоспособности трелёвочного волокна или технологического коридора при использовании колёсной лесной машины или трелёвочной системы. Достаточность достигается

формированием колеи, глубина которой h не превышает нормативного значения $h_n = 0,2$ м.

Глубина колеи h определена на основе математической модели разрушения сплошной среды с внутренним трением [16, 17], которая, как отмечено в [11, 12], наиболее адекватно отражает наличие корневой системы в краевой части массива почвогрунта:

$$h = a \left(\frac{q}{\tau} \right)^{1-\gamma/2}, \quad (4)$$

где введены следующие обозначения:

- a – радиус зоны контактного сближения круглого индентора (шины) радиусом R под нагрузкой Q с армированным почвогрунтом, упругопластические свойства которого характеризуются коэффициентом Пуассона ν и модулем общей деформации E [18];
- $\gamma = \frac{\nu}{1-\nu}$ – коэффициент бокового распора;
- $q = \gamma p$ – горизонтальное давление сдвига, действующее на слой почвогрунта.

На рисунке 7 приведены результаты расчётов глубины колеи h (м) в зависимости от параметра μ насыщения почвогрунта корневой системой деревьев (%). Расчёты выполнены для следующих геотехнических условий:

- переувлажнённый суглинок с влажностью, близкой к состоянию солифлюкции: $W = 40\%$, $\nu = 0,4$, $E = 200$ кПа;
- параметры взаимодействия колёсной лесной машины на склоне: $Q = 14$ т, $S = 0,309$ м², $\alpha = 20^\circ$, $p = 42,58$ кПа, $R = 0,41$ м, $a = 0,23$ м.

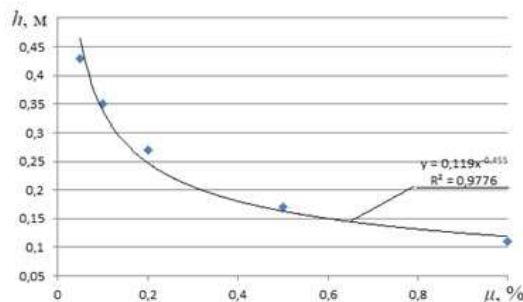


Рисунок 7. Изменение глубины колеи с ростом насыщения почвогрунта корнями деревьев
Figure 7. Changes in track depth with increasing saturation of the soil with tree roots

Источник: собственная композиция авторов / Source: author's composition

Из данных, представленных на рисунке 7, следует, что при отсутствии корневой системы ($\mu = 0$) глубина колеи превышает 0,4 м, что требует корректировки параметров загрузки лесной машины и применения гусеничных лент для снижения давления на почвогрунт до значений $p = 10 \div 14$ кПа. Наличие корневой системы и реализация её армирующей функции повышают несущую способность грунтово-корневого слоя,

что способствует формированию колеи глубиной, не превышающей нормативного значения 0,2 м.

Обсуждение

В рассматриваемом диапазоне инженерно-геотехнических условий функционирования колесных лесных машин, включая трелевочные системы, агрегируемые на их базе, при отсутствии в приповерхностном горизонте почвогрунта выраженного корненасыщенного слоя глубина формируемой технологической колеи способна превышать 0,4 м. Достижение указанного уровня деформационного преобразования опорной поверхности свидетельствует о существенном снижении эксплуатационной пригодности трелевочного волокна и, как следствие, предопределяет необходимость корректировки режимно-нагрузочных параметров работы машины. В подобных условиях технически и технологически обоснованным становится применение специальных средств снижения контактных напряжений, в частности колесных движителей, оснащенных гусеничными лентами, обеспечивающими многократное уменьшение удельного давления на почвогрунт до уровня 10–14 кПа.

Существенное значение в механизме сопротивления деформационному разрушению лесного почвогрунта имеет развитая корневая система древесной растительности, выполняющая функцию природного пространственно распределенного армирующего каркаса. Наличие корненасыщенного горизонта обуславливает повышение структурной связности грунтового массива, увеличение его сопротивления сдвигу, а также перераспределение локальных напряжений, возникающих в зоне контакта колесного движителя с опорной поверхностью. В совокупности указанные эффекты способствуют ограничению интенсивности пластических деформаций, снижению темпов колесобразования и стабилизации эксплуатационного состояния трелевочного волокна.

Особую значимость рассматриваемые процессы приобретают в условиях склонового рельефа, где взаимодействие движителя с почвогрунтом протекает под воздействием как нормальных, так и касательных составляющих внешней нагрузки. Наличие продольной компоненты силы тяжести, ориентированной вдоль поверхности склона, интенсифицирует сдвиговые деформации в приповерхностном горизонте, повышает вероятность локального нарушения целостности почвогрунта и ускоряет развитие колеи. В этой связи армирующее влияние корневых систем следует рассматривать как один из определяющих факторов обеспечения работоспособности трелевочного волокна на склоновых участках.

С учетом того, что диаметр ствола дерева находится в функциональной связи с иными таксационными характеристиками древесной растительности, прежде всего с высотой, возрастом и параметрами развития корневой системы, данный показатель может быть использован в качестве косвенного диагностического индикатора степени корненасыщенности почвогрунта. В методическом отношении использование среднего диаметра стволов деревьев как расчетно-оценочного признака представляется обоснованным при проведении таксационных, инженерно-лесотехнических и инженерно-экологических исследований на участках лесного фонда, приуроченных к склоновым формам рельефа.

Полученная и представленная на рисунке 8 корреляционная зависимость $h(d)$, характеризующаяся высокой степенью детерминации, позволяет сделать вывод о наличии статистически значимой и практически интерпретируемой связи между глубиной колеи и средним диаметром стволов древесной растительности.

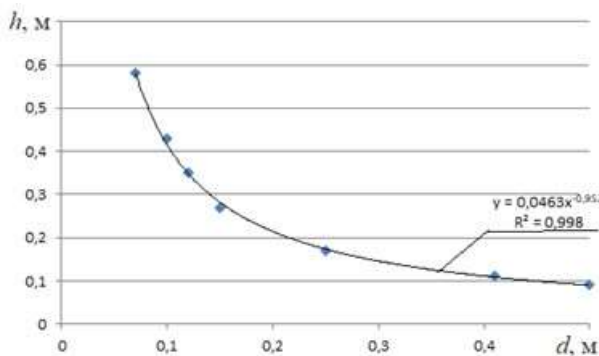


Рисунок 8. Влияние диаметра деревьев вблизи трелевочного волока (технологического коридора) на глубину его колеи

Figure 8. Influence of the diameter of trees near the skidding portage (technological corridor) on the depth of its track

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Это дает основание при выполнении прикладных инженерных оценок исходить из положения о том, что глубина колееобразования находится в обратной зависимости от среднего диаметра стволов деревьев на рассматриваемом участке. Установленная зависимость может быть использована при прогнозировании работоспособности трелевочного волока на склонах, обосновании допустимых режимов эксплуатации колесных лесных машин, выборе направлений прокладки технологических

коридоров и назначении мероприятий по снижению отрицательного техногенного воздействия на лесной почвогрунт.

Заключение

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что корневая система сосны оказывает существенное армирующее воздействие на грунтово-корневой слой склона, которое количественно описывается параметром степени насыщения μ приростом удельного сцепления ΔC . Показано, что параметр μ зависит от среднего диаметра ствола деревьев d и расстояния между ними L , а при типовых значениях ширины трелевочного волока $H = 4 \div 5$ м и $d = 0,1 \div 0,3$ м величина μ не превышает 0,65%. При этом прирост удельного сцепления ΔC даже при $\mu = 0,1 \div 0,2\%$ соизмерим с базовым сцеплением $C = 6 \div 12$ кПа для грунтов без развитой корневой системы.

Разработана методика расчёта предела прочности на срез армированного слоя почвогрунта с использованием модифицированного критерия Мора – Кулона, учитывающего дополнительное сцепление от корней. Введён коэффициент устойчивости K_y , позволяющий оценить состояние краевой части массива склона. Установлено, что при $\mu > 0,2\%$ склон переходит в устойчивое состояние ($K_y > 1$), а армирующий эффект корней повышает допустимый угол крутизны склона с 14 до 25°.

Определено, что глубина колеи h экспоненциально снижается с ростом степени насыщения μ . При отсутствии корней ($\mu = 0$) глубина колеи превышает 0,4 м, что требует снижения нагрузки на движитель и применения гусеничных лент. Наличие корневой системы ($\mu > 0,2\%$) обеспечивает глубину колеи в пределах нормативного значения 0,2 м. Установлена обратная пропорциональная зависимость глубины колеи от среднего диаметра стволов деревьев вблизи волока: при $d > 0,25$ м глубина колеи не превышает допустимых значений, тогда как при $d = 0,05 \div 0,1$ м (молодые деревья) глубина колеи может достигать клиренса машины.

Практическая значимость результатов заключается в возможности прогнозирования несущей способности склонов и глубины колеи на основе таксационных параметров древостоя (средний диаметр стволов, расстояние между деревьями, ширина волока). Полученные зависимости позволяют обосновать необходимость сохранения корневой системы деревьев вблизи трелевочных волоков для повышения их работоспособности и снижения экологического ущерба.

Список литературы

1. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Федоров В.И., Задраускайте Н.О., Египко С.В., Дьячковский Д.А. Взаимодействие колёсного движителя с почвогрунтом на склоне, с учётом эффекта буксования // *Resources and Technology*. 2025; 22 (3): 184-202. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8903>
2. Дмитриев А.С., Должиков И.С., Куницкая О.А., Дьяченко В.М., Гурьев А.Ю., Кривошеев А.А. Экспериментальные исследования воздействия колёсно-гусеничного движителя на лесные почвогрунты // *Resources and Technology*. 2025; 22 (2): 17-50. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8004>
3. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Новиков М.С., Перфильев П.Н., Друзьянова В.П., Макуев В.А. Особенности взаимодействия движителя лесной машины при маневрировании на склоне криолитозоны при циклических нагрузках // *Resources and Technology*. 2025; 22 (2): 128-148. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8603>
4. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion // *IEEE Transactions on Robotics*. 2023; 39 (2): 941-958. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>
5. Piskunov M. Influence of Stump Root System of Trees on Rut Formation During Forwarder Operation on Peat Soils // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2023; 44 (2): 217-231. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2116>
6. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance // *Forests*. 2023; 14 (1): 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>
7. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning // *Biosystems Engineering*. 2025; 258: 104255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>
8. Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2022; 15 (6): 476-483. DOI: <https://doi.org/10.3832/for4138-015>
9. Корякин В.Н., Козыренко Н.А., Брагин А.Д. Влияние корневых систем древесной растительности на устойчивость склонов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. 2023; (2): 45-53.
10. Калинин М.Д., Сергеева Т.В., Рукомойников К.П. Лабораторные исследования несущей способности армированного корнями почвогрунта // *Лесотехнический журнал*. 2023; 13 (2): 89-101.
11. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В. и др. Теоретический расчет несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019; (226): 111-123. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.226.111-123>
12. Болотин Д.В., Кокшаров М.А., Жук А.Ю., Андронов А.В. Задача оптимизации шага грунтозацепов гусеничных лесных машин для чувствительных почвогрунтов // *Системы. Методы. Технологии*. 2026; (1): 137-143. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2026-1-137-143>
13. Мисуно Ю.И. Методика экспериментальных исследований по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2021; (1): 132-140.
14. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2007; (6): 31-34.
15. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»; 2010. 544 с.
16. Guerra F., Marzini S., Sforza F., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Exploring the reliability of CAN-bus data in assessing forwarder rolling resistance under real working conditions // *iForest*. 2024; 17: 360-369. DOI: <https://doi.org/10.3832/for4687-017>
17. Masi E.B., Segoni S., Tofani V. Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review // *Geosciences*. 2021; 11 (5): 212. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11050212>
18. Yin W., Pan Y., Yang M., Li Z. The root reinforcement on the slope under the condition of colonization of various herbaceous plants // *Heliyon*. 2024; 10 (17): e37108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37108>
19. Chavez Torres J.L., Feng T., Zhang K., Kookalani S. Ecological Engineering Contributions to Slope Stability Through Root Reinforcement in Diverse Soils // *Applied Sciences*. 2025; 15 (21): 11810. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152111810>

References

1. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Fedorov V.I., Zadrauskaite N.O., Eypko S.V., Dyachkovsky D.A. Vzaimodeystvie kolesnogo dvizhitelya s pochvogruntom na sklone, s uchetom effekta buksovaniya. [Interaction of a wheeled propulsion system with the soil on a slope, taking into account the skidding effect]. *Resources and Technology*. 2025;22(3):184-202. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8903>.

2. Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Dyachenko V.M., Guryev A.Yu., Krivosheev A.A. Eksperimentalnye issledovaniya vozdeystviya kolesno-gusenichnogo dvizhitelya na lesnye pochvogruty. [Experimental studies of the impact of a wheeled-tracked propulsion system on forest soils]. Resources and Technology. 2025;22(2):17-50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8004>.
3. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Novikov M.S., Perfiliev P.N., Druzyanova V.P., Makuev V.A. Osobennosti vzaimodeystviya dvizhitelya lesnoy mashiny pri manevrirovanii na sklone kriolitozony pri tsiklicheskih nagruzkakh. [Features of interaction of a forest machine propulsion system during maneuvering on a slope of the cryolithozone under cyclic loads]. Resources and Technology. 2025;22(2):128-148. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2025.8603>.
4. Zheng C., Sane S., Lee K., Kalyanram V., Lee K. α -WaLTR: Adaptive Wheel-and-Leg Transformable Robot for Versatile Multiterrain Locomotion. IEEE Transactions on Robotics. 2023;39(2):941-958. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3226114>.
5. Piskunov M. Influence of Stump Root System of Trees on Rut Formation During Forwarder Operation on Peat Soils. Croatian Journal of Forest Engineering. 2023;44(2):217-231. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2116>.
6. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance. Forests. 2023;14(1):103. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010103>.
7. Grube G., Grigolato S., Ala-Ilomäki J., Routa J., Lindeman H., Astrup R., Talbot B. Modelling machine-induced soil deformation in forest soils using stump proximity and machine learning. Biosystems Engineering. 2025;258:104255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104255>.
8. Pandur Z., Kopseak H., Šušnjar M., Landekić M., Šporčić M., Bačić M. Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. iForest – Biogeosciences and Forestry. 2022;15(6):476-483. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer4138-015>.
9. Koryakin V.N., Kozyrenko N.A., Bragin A.D. Vliyanie kornevykh sistem drevesnoy rastitelnosti na ustoychivost sklonov. [Influence of tree root systems on slope stability]. Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2023;(2):45-53. (In Russ.).
10. Kalinin M.D., Sergeeva T.V., Rukomoynikov K.P. Laboratornye issledovaniya nesushchey sposobnosti armirovannogo kornyami pochvogrunta. [Laboratory studies of the bearing capacity of root-reinforced soil]. Lesotekhnicheskii zhurnal. 2023;13(2):89-101. (In Russ.).
11. Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., et al. Teoreticheskiy raschet nesushchey sposobnosti svyaznogo grunta po konusnomu indeksu i mekhanicheskim svoystvam. [Theoretical calculation of the bearing capacity of cohesive soil by cone index and mechanical properties]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2019;(226):111-123. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.226.111-123>.
12. Bolotin D.V., Koksharov M.A., Zhuk A.Yu., Andronov A.V. Zadacha optimizatsii shaga gruntozatsepov gusenichnykh lesnykh mashin dlya chuvstvitelnykh pochvogrunтов. [Optimization problem of track grouser pitch for sensitive forest soils]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2026;(1):137-143. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2026-1-137-143>.
13. Misuno Yu.I. Metodika eksperimentalnykh issledovaniy po otsenke ekspluatatsionno-ekologicheskoy sovместимости lesnykh mashin s pochvogrunami. [Methodology of experimental studies for assessing the operational and ecological compatibility of forest machines with soils]. Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov. 2021;(1):132-140. (In Russ.).
14. Tsarapov M.N. Formirovanie prochnostnykh kharakteristik gruntov v protsesse ottaivaniya. [Formation of soil strength characteristics during thawing]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya. 2007;(6):31-34. (In Russ.).
15. Morozov E.M., Zernin M.V. Kontaktnye zadachi mekhaniki razrusheniya. [Contact problems of fracture mechanics]. 2nd ed. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM»; 2010. 544 p. (In Russ.).
16. Guerra F., Marzini S., Sforza F., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Exploring the reliability of CAN-bus data in assessing forwarder rolling resistance under real working conditions. iForest. 2024;17:360-369. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer4687-017>.
17. Masi E.B., Segoni S., Tofani V. Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review. Geosciences. 2021;11(5):212. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11050212>.
18. Yin W., Pan Y., Yang M., Li Z. The root reinforcement on the slope under the condition of colonization of various herbaceous plants. Heliyon. 2024;10(17):e37108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37108>.
19. Chavez Torres J.L., Feng T., Zhang K., Kookalani S. Ecological Engineering Contributions to Slope Stability Through Root Reinforcement in Diverse Soils. Applied Sciences. 2025;15(21):11810. DOI: <https://doi.org/10.3390/app152111810>.

Сведения об авторах

Шапиро Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок, д. 13, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, 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», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, 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», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8336-1124>, e-mail: irosmagelav@mail.ru.

Тихонов Евгений Андреевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, 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», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.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, Institutsky Lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation, 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, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation, 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 University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, 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, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, 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, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author



**Анализ соответствия региональных лесных планов целям
федеральной стратегии развития лесного комплекса России
(на примере субъектов СЗФО)**

Наталья А. Литвинова¹, hinode-nata@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3355-7967>

Анна Г. Изотова¹, izotovaanna411@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4380-5066>

Елена С. Гаврилюк¹, gavrilyukes@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3869-1578>

Даниил С. Бурцев¹, forest1641@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4825-1162>

¹ ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства»,
Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

В статье рассматриваются особенности стратегического планирования в лесном хозяйстве Российской Федерации на региональном уровне. Целью исследования является анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа и выявление различий в их структуре, системе показателей эффективности и стратегических приоритетах развития лесного комплекса. Методологической основой исследования послужили сравнительный и контент-анализ текстов лесных планов одиннадцати субъектов СЗФО. В ходе исследования выявлено, что связь региональных лесных планов с федеральной стратегией развития лесного комплекса во многих случаях носит преимущественно формальный характер. Установлены различия в стратегических приоритетах регионов, системе показателей эффективности и роли лесного плана в системе управления лесным хозяйством. Проведена типологизация региональных лесных планов по степени интеграции с федеральной лесной политикой и моделям лесного планирования. Результаты исследования показывают, что при формально единой структуре документов региональные планы формируют неоднородную систему стратегического управления лесным комплексом. Сделан вывод о необходимости совершенствования методологических подходов к разработке лесных планов субъектов Российской Федерации и повышения степени их согласованности с федеральными стратегическими документами, что является важным условием формирования Национального лесного плана Российской Федерации.

Ключевые слова: *лесной план, стратегическое планирование, лесное хозяйство, региональная лесная политика, показатели эффективности, Национальный лесной план*

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства лесного хозяйства от 26.12.2024 г. № 053-00005-25-00 по теме «Разработка научно обоснованных предложений по совершенствованию и развитию лесного планирования в рамках государственного технического и бюджетного планирования Российской Федерации» (шифр: 2-Э25 национальный лесной план).

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Анализ соответствия региональных лесных планов целям федеральной стратегии развития лесного комплекса России (на примере субъектов СЗФО) / Н. А. Литвинова, А. Г. Изотова, Е. С. Гаврилюк, Д. С. Бурцев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 258–279. – Библиогр.: с. 275–278 (26 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/17>.

Поступила 25.01.2026. Пересмотрена 23.04.2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Analysis of the compliance of regional forest plans with the goals of the federal strategy for the development of Russia's forest complex (using the example of the Northwestern Federal District)

Natalia A. Litvinova¹, hinode-nata@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3355-7967>

Anna G. Izotova¹, izotovaanna411@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-4380-5066>

Elena S. Gavriluk¹, gavrilyukes@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-3869-1578>

Daniil S. Burtsev¹, forest1641@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-4825-1162>

¹*Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation*

Abstract

This article examines the specifics of strategic planning in forestry in the Russian Federation at the regional level. The aim of the study is to analyze forest plans in the constituent entities of the Northwestern Federal District and identify differences in their structure, performance indicator system, and strategic priorities for forestry development. The methodological basis for the study is a comparative and content analysis of forestry plan texts from eleven constituent entities of the Northwestern Federal District. The study revealed that the connection between regional forestry plans and the federal forestry development strategy is, in many cases, primarily formal. Differences in regional strategic priorities, performance indicator system, and the role of forestry plans in forestry management are identified. A typology of regional forestry plans is provided based on their integration with federal forestry policy and forestry planning models. The results of the study demonstrate that, despite a formally uniform document structure, regional plans form a heterogeneous system of strategic forestry management. A conclusion was made on the need to improve methodological approaches to the development of forest plans for the constituent entities of the Russian Federation and to increase the degree of their consistency with federal strategic documents, which is an important condition for the formation of the National Forest Plan of the Russian Federation.

Keywords: *forest plan, strategic planning, forestry, regional forest policy, performance indicators, National Forest Plan*

Funding: The research 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 scientifically sound proposals for improving and developing forest planning within the framework of state technical and budgetary planning of the Russian Federation» (code: 2-E25 national forest plan).

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

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

For citation: Litvinova N. A., Izotova A. G., Gavriluk E. S., Burtsev D. S. (2026) Analysis of the compliance of regional forest plans with the goals of the federal strategy for the development of Russia's forest complex (using the example of the Northwestern Federal District). *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 258–279 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/17>.

Received 25.01.2026.

Revised 23.04. 2026.

Accepted 15.05.2026.

Published online 26.06.2026

Введение

Стратегическое планирование является одним из ключевых инструментов государственного управления лесными ресурсами, обеспечивающим согласование долгосрочных целей развития лесного комплекса с задачами устойчивого природопользования и социально-экономического развития территорий. В Российской Федерации система стратегического планирования в лесном хозяйстве формируется на основе нормативно-правовых актов федерального уровня и включает

комплекс документов, определяющих направления использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов. Важнейшим элементом данной системы выступают лесные планы субъектов Российской Федерации, которые разрабатываются в соответствии с требованиями лесного законодательства и определяют основные параметры развития лесного хозяйства на региональном уровне [1].

В соответствии с действующим законодательством лесные планы разрабатываются на долгосрочный период и определяют направления

использования лесных ресурсов, мероприятия по охране и воспроизводству лесов, а также показатели развития лесного хозяйства на территории субъекта Российской Федерации. При этом общие ориентиры развития лесного комплекса закреплены в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года и государственной программе «Развитие лесного хозяйства», которые формируют систему целевых показателей и стратегических направлений государственной лесной политики [2, 3].

В научной литературе отмечается, что система стратегического планирования в лесном хозяйстве Российской Федерации характеризуется рядом институциональных и методологических проблем, связанных с недостаточной согласованностью документов различных уровней управления, неоднородностью системы показателей и ограниченной сопоставимостью региональных лесных планов. Исследователи указывают на различия в подходах субъектов Российской Федерации к формированию целей, задач и показателей лесного планирования, а также на необходимость повышения степени интеграции региональных документов с федеральной стратегией развития лесного комплекса. Так, в работах Е.А. Shvarts et al. (2023), R.V. Gordeev et al. (2021) подчеркивается высокая пространственная и институциональная неоднородность развития лесного сектора России, обусловленная различиями в экономической специализации регионов, структуре лесного фонда, транспортной инфраструктуре и инвестиционной активности [4; 5]. Кроме того, D. Dobrynin et al. (2021) отмечают противоречие между декларируемыми принципами устойчивого лесопользования и фактическими практиками освоения лесных ресурсов [6].

Отдельное внимание в исследованиях уделяется проблемам регионального лесного планирования. Т. В. Якушева и соавторы (2024) отмечают несогласованность лесных планов субъектов Российской Федерации с региональными программами развития лесного хозяйства [7].

Вопросы совершенствования регионального лесного планирования рассматриваются в исследованиях Л. С. Ветрова и соавторов (2022), где подчеркивается необходимость повышения качества планирования и его методического обеспечения [8]. Н. А. Петрунин анализирует проблемы стратегического планирования и недостатки отраслевой отчетности, влияющие на управленческие решения [9;10].

Экономические аспекты лесного планирования раскрываются в работе А. Г. Третьякова (2021), который рассматривает экономическую доступность лесных ресурсов как фактор планирования [11]. В свою очередь, И. Ф. Кузьминов и соавторы (2020) подчеркивают

необходимость интеграции научно-технологического прогнозирования в систему стратегического планирования [12]. Институциональные аспекты управления лесными отношениями рассматриваются И. В. Бечиной (2020) [13].

Таким образом, анализ научной литературы показывает, что при наличии нормативно закреплённой системы лесного планирования в Российской Федерации сохраняется значительная неоднородность подходов к разработке лесных планов субъектов. Это проявляется в различиях их структуры, системы показателей, уровня аналитической проработки и степени интеграции в систему стратегического планирования.

В связи с этим в научной среде всё чаще поднимается вопрос о необходимости формирования Национального лесного плана Российской Федерации как инструмента согласования федеральных и региональных подходов к управлению лесными ресурсами.

Важным этапом разработки такого документа является анализ действующих лесных планов субъектов Российской Федерации, позволяющий выявить особенности региональных подходов к стратегическому планированию. Особый интерес в этом отношении представляет Северо-Западный федеральный округ, характеризующийся значительным ресурсным потенциалом и разнообразием моделей лесопользования.

Целью настоящего исследования является анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа и выявление различий в их стратегических приоритетах, системе показателей эффективности и подходах к планированию развития лесного хозяйства.

Материалы и методы

Материалами исследования послужили действующие лесные планы субъектов Российской Федерации, входящих в состав Северо-Западного федерального округа (СЗФО): Мурманской, Архангельской, Вологодской, Ленинградской, Новгородской, Псковской и Калининградской областей, республик Карелия и Коми, Ненецкого автономного округа, а также Санкт-Петербурга.

В качестве эмпирической базы исследования использованы действующие лесные планы субъектов Северо-Западного федерального округа, приложения к ним, а также документы о внесении изменений в лесные планы. Перечень субъектов, лесные планы которых проанализированы, и временной период планирования представлены ниже:

1. Мурманская область, период планирования – 2019-2028;

2. Архангельская область, период планирования – 2019-2028;
3. Республика Карелия, период планирования – 2019-2028;
4. Республика Коми, период планирования – 2020-2029;
5. Вологодская область, период планирования – 2019-2028;
6. Ленинградская область, период планирования – 2019-2028;
7. Новгородская область, период планирования – 2019-2028;
8. Псковская область, период планирования – 2019-2028;
9. Калининградская область, период планирования – 2019-2028;
10. Ненецкий автономный округ, период планирования – 2019-2028;
11. Санкт-Петербург, период планирования – 2025-2033.

Представленные данные показывают, что большинство лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа разработаны на десятилетний период планирования [14-24]. Вместе с тем отдельные регионы имеют отличающиеся сроки действия лесных планов, что связано с различиями в сроках утверждения документов и последующим внесением изменений в региональные стратегии развития лесного комплекса.

Методологическую основу исследования составили сравнительный анализ, структурно-функциональный анализ и контент-анализ. На первом этапе был проведен сравнительный анализ структуры и содержания лесных планов субъектов СЗФО. На втором этапе осуществлялся контент-анализ разделов, посвященных целям и задачам лесного планирования, системе показателей эффективности, экономическому обоснованию, а также мероприятиям по использованию, охране, защите и воспроизводству лесов. На третьем этапе проводилась типологизация региональных лесных планов по степени связи с федеральной стратегией, стратегическим приоритетам, преобладающим показателям эффективности и характеру управленческой роли документа. В исследовании использовались методы качественной интерпретации текстовых формулировок, сопоставления нормативных оснований разработки лесных планов и сравнительного анализа табличных и количественных данных, представленных в региональных документах. Такой подход позволил выявить различия в содержании и функциях лесных планов субъектов СЗФО и оценить степень их пригодности для формирования единой системы национального лесного планирования.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является система стратегического планирования в лесном хозяйстве Российской Федерации на региональном уровне.

Предметом исследования выступают содержание, структура и показатели эффективности лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа, а также их соответствие целям федеральной стратегии развития лесного комплекса.

Результаты и обсуждение

В условиях формирования единой системы стратегического планирования в Российской Федерации особое значение приобретает разработка Национального лесного плана. Предполагается, что данный документ станет инструментом координации государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов на федеральном уровне и обеспечит согласование региональных стратегий развития лесного комплекса.

При этом региональные лесные планы должны выступать одним из ключевых источников информации для формирования национального стратегического документа. Их сопоставимость, наличие единых показателей эффективности и согласованность с федеральными стратегическими приоритетами являются необходимым условием для формирования целостной системы стратегического управления лесным хозяйством.

В этой связи анализ структуры и содержания лесных планов субъектов Российской Федерации позволяет выявить существующие различия в подходах к стратегическому планированию и определить основные проблемы интеграции региональных документов в систему национального лесного планирования.

1. Недостаточная связь лесных планов регионов с федеральной политикой

Анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показывает, что связь региональных документов с федеральной лесной политикой во многих случаях носит преимущественно формальный характер. Федеральные стратегические документы, такие как Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации» и «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года», как правило, включаются в перечень нормативных и методических оснований разработки лесного плана [25; 26].

Так, в ряде региональных планов данные документы прямо указаны как база для их разработки. Например, в лесном плане Псковской области упоминаются «Федеральный закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом

Природопользование

планировании в Российской Федерации» и «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года» [21]. Аналогичные ссылки присутствуют и в лесном плане Ленинградской области.

Однако дальнейший анализ разделов, посвящённых целям и задачам лесного планирования, показывает, что федеральные документы не всегда становятся содержательной основой постановки региональных целей и показателей. Цели региональных лесных планов чаще формулируются в общем виде – как повышение эффективности использования лесов, обеспечение устойчивого управления или развитие лесного комплекса региона. При этом прямое преобразование федеральных стратегических ориентиров в систему региональных индикаторов и

целевых показателей в текстах планов прослеживается не всегда.

В результате федеральная политика в региональных лесных планах выступает преимущественно как нормативная рамка разработки документа, но не как детально декомпозированная система целей и показателей, обязательных для реализации на уровне субъектов Российской Федерации. Это приводит к тому, что региональные планы сохраняют значительную степень автономности и формируют неоднородную систему стратегического планирования лесного комплекса страны. В таблице 1 представлен анализ формулировок целей лесных планов регионов и их связь с федеральной стратегией.

Таблица 1

Связь региональных лесных планов субъектов СЗФО с федеральными стратегическими документами

Table 1

Relationship between regional forestry plans of the Northwestern Federal District's constituent entities and federal strategic documents

Регион Region	Федеральные документы, указанные в плане Federal documents specified in the plan	Формулировки целей в лесном плане Formulation of objectives in the forest plan	Характер связи с федеральной стратегией The nature of the connection with the federal strategy
Псковская область Pskov region	«Федеральный закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ “О стратегическом планировании в Российской Федерации”», «Основы государственной политики... до 2030 года» «Federal Law No. 172-FZ of June 28, 2014 "On Strategic Planning in the Russian Federation"», «Fundamentals of State Policy ... until 2030»	«Повышение эффективности использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов», «обеспечение стабильного удовлетворения общественных потребностей в ресурсах и полезных свойствах леса» «Improving the efficiency of use, protection, protection and reproduction of forests», «ensuring stable satisfaction of public needs for resources and beneficial properties of forests»	Федеральные документы перечислены как основа разработки, однако цели сформулированы в общем виде и не связаны напрямую с федеральными показателями Federal documents are listed as the basis for development, but the goals are formulated in a general way and are not directly related to federal indicators
Ленинградская область Leningrad region	«Федеральный закон №172-ФЗ», «Основы государственной политики... до 2030 года» «Federal Law No. 172-FZ», «Fundamentals of State Policy... until 2030»	«Повышение эффективности использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов», «обеспечение стабильного удовлетворения общественных потребностей...» «Improving the efficiency of the use, protection, protection and reproduction of forests», «ensuring stable satisfaction of public needs ...»	Федеральные документы присутствуют в нормативной базе, однако цели сформулированы преимущественно на уровне региональных задач Federal documents are present in the regulatory framework, but the goals are formulated primarily at the level of regional objectives
Мурманская область Murmansk region	Государственная программа РФ «Развитие лесного хозяйства», типовая форма лесного	«Эффективное управление лесами региона», «обеспечение рационального, многоцелевого, непрерывного и	Федеральная политика упоминается как нормативная основа, но цели сформулированы

Природопользование

	плана The State program of the Russian Federation «Development of forestry», the standard form of the forest plan	неистощительного использования лесов» «Effective management of the region's forests», «ensuring rational, multi-purpose, continuous and sustainable use of forests»	через общую концепцию устойчивого управления Federal policy is referred to as a regulatory framework, but the goals are formulated through a general concept of sustainable management
Республика Карелия Republic of Karelia	Типовая форма лесного плана субъекта РФ, документы стратегического планирования The standard form of the forest plan of the subject of the Russian Federation, documents of strategic planning	«Увеличение объема рубок лесных насаждений...», «увеличение доли искусственного лесовосстановления...», «увеличение объема платежей в бюджетную систему Российской Федерации...» «An increase in the volume of logging...», «an increase in the share of artificial reforestation...», «an increase in payments to the budget system of the Russian Federation...»	Цели выражены через количественные показатели, однако план в большей степени ориентирован на региональную стратегию развития The goals are expressed through quantitative indicators, but the plan is more focused on a regional development strategy
Архангельская область Arkhangelsk region	«Основы государственной политики...», государственная программа РФ «Развитие лесного хозяйства», стратегия социально-экономического развития Северо-Западного федерального округа «Fundamentals of state policy...», the state program of the Russian Federation «Development of forestry», the strategy of socio-economic development of the North-Western Federal District	«Достижение устойчивого управления лесами», «повышение эффективности управления лесами и лесным хозяйством на основе реализации единой государственной политики...» «Achieving sustainable forest management», «improving the efficiency of forest and forestry management based on the implementation of a unified state policy...»	Наиболее выраженная связь с федеральной политикой, однако федеральные стратегические показатели не полностью транслируются на региональный уровень The most pronounced connection is with federal policy, but federal strategic indicators are not fully translated to the regional level
Республика Коми Komi Republic	Государственная программа РФ «Развитие лесного хозяйства», федеральные документы стратегического планирования The State Program of the Russian Federation «Development of forestry», federal strategic planning documents	«Увеличение объема рубок лесных насаждений...», «увеличение объемов платежей в бюджетную систему от использования лесов...», «создание современной конкурентоспособной лесной промышленности» «Increasing the volume of logging...», «increasing payments to the budget system from the use of forests...», «creating a modern competitive forestry industry»	Федеральные стратегические ориентиры учитываются, однако ключевые цели связаны преимущественно с развитием регионального лесопромышленного комплекса Federal strategic guidelines are taken into account, but the key goals are mainly related to the development of the regional timber industry
Вологодская область Vologda region	Государственная программа РФ «Развитие лесного хозяйства», документы стратегического планирования The State	«Развитие инвестиционных проектов освоения лесов», «внедрение интенсивной модели использования и воспроизводства лесов» «Development of investment	План ориентирован на развитие регионального лесопромышленного комплекса, связь с федеральной стратегией выражена частично The

Природопользование

	Program of the Russian Federation «Forestry Development», strategic planning documents	projects for forest development», «introduction of an intensive model of forest use and reproduction»	plan is focused on the development of the regional timber industry, the connection with the federal strategy is partially expressed
Новгородская область Novgorod region	Федеральные документы стратегического планирования и государственные программы Federal strategic planning documents and government programs	«Обеспечение устойчивого использования лесов», «развитие лесного комплекса региона» «Ensuring the sustainable use of forests», «development of the forest complex of the region»	Федеральные документы используются как нормативная база, однако цели сформулированы преимущественно в региональном контексте Federal documents are used as a regulatory framework, but the goals are formulated primarily in a regional context
Калининградская область Kaliningrad region	Федеральные нормативные документы и стратегия развития лесного хозяйства Federal regulations and forestry development strategy	«Сохранение защитных функций лесов», «обеспечение рекреационного использования лесов» «Preservation of protective functions of forests», «ensuring recreational use of forests»	Основной акцент на экологических и рекреационных функциях лесов, связь с федеральной экономической стратегией выражена слабо The main focus is on the ecological and recreational functions of forests, the connection with the federal economic strategy is poorly expressed
Ненецкий автономный округ Nenets Autonomous Area	Федеральные документы лесной политики и государственные программы Federal forest policy documents and government programs	«Обеспечение охраны, защиты и воспроизводства лесов», «устойчивое использование лесных ресурсов» «Ensuring the protection, protection and reproduction of forests», «sustainable use of forest resources»	Федеральные стратегические документы указаны как нормативная база, однако конкретные показатели реализации выражены ограниченно Federal strategic documents are indicated as the regulatory framework, but specific implementation indicators are limited
Санкт-Петербург Saint-Petersburg	Лесной кодекс РФ, федеральные документы лесной политики The Forest Code of the Russian Federation, federal forest policy documents	«Сохранение защитных, санитарно-гигиенических и рекреационных функций лесов» «Preservation of protective, sanitary, hygienic and recreational functions of forests»	План ориентирован преимущественно на экологические функции лесов и выполняет регламентирующую роль The plan focuses primarily on the ecological functions of forests and performs a regulatory role

Источник: составлено авторами на основе данных [14-24].

Source: compiled by the authors based on data from [14-24].

Сравнение лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показывает, что федеральные стратегические документы, как правило, включаются в перечень нормативных оснований разработки региональных планов. Однако их роль в формировании системы целей и показателей лесного планирования различается.

В большинстве случаев федеральная политика присутствует в региональных лесных планах в виде формального упоминания нормативной базы, тогда как конкретные цели и задачи формируются преимущественно исходя из региональных условий и приоритетов развития лесного комплекса. Это приводит к неоднородности структуры целей и показателей региональных планов и затрудняет формирование единой системы стратегического управления лесным комплексом на национальном уровне.

Проведённое исследование позволяет выделить три типа связи региональных лесных планов с федеральной стратегией развития лесного комплекса: формальная, частично интегрированная и содержательно интегрированная связь. Типология построена на основе следующих измеримых параметров:

- наличие и характер отсылок к федеральным стратегическим документам в разделах, определяющих цели и задачи лесного плана;

- степень совпадения системы показателей лесного плана с федеральными стратегическими индикаторами по наименованию, единице измерения и логике расчёта;

- наличие декомпозиции федеральных целевых ориентиров на региональный уровень.

Для оценки степени интеграции использовался сравнительный анализ целей, задач и системы показателей лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа. В качестве единицы сопоставления принимались показатели, совпадающие с федеральными стратегическими индикаторами одновременно по трём параметрам: наименование показателя, единица измерения и логика расчёта. Границы между типами связи определялись на основе доли таких показателей в общей системе целевых индикаторов лесного плана. Рассмотрим их более подробно.

1. Формальная связь региональных лесных планов с федеральной стратегией развития лесного комплекса.

В таких случаях федеральные документы выступают преимущественно как нормативное основание разработки, но не становятся содержательной основой региональной лесной политики. Федеральные стратегические документы упоминаются в разделе исходных данных или нормативной базы лесного плана, однако их

положения практически не используются при формировании системы целей и задач документа.

Измеримые признаки:

- федеральные документы перечислены исключительно среди источников разработки и не цитируются в разделах, формулирующих цели, задачи и показатели;

- цели сформулированы в общем виде (например, «повышение эффективности использования лесов», «обеспечение устойчивого управления») без привязки к конкретным федеральным целевым индикаторам;

- доля показателей, сопоставимых с федеральными стратегическими индикаторами, составляет менее 10 %.

Примерами таких планов являются лесные планы Псковской и Ленинградской областей. В данных документах федеральные стратегические документы указаны в перечне нормативных оснований разработки, однако цели ориентированы преимущественно на решение региональных задач, а система показателей не содержит прямой декомпозиции федеральных индикаторов.

2. Частично интегрированная связь региональных лесных планов с федеральной стратегией развития лесного комплекса.

В данном случае федеральная стратегия учитывается при разработке региональных планов, однако её влияние проявляется фрагментарно. Часть целей и показателей формируется на основе федеральных ориентиров, но значительная доля положений связана с региональными приоритетами развития лесного комплекса.

Измеримые признаки:

- в тексте лесного плана присутствуют прямые ссылки на федеральные стратегические документы при обосновании отдельных целей и задач;

- отдельные показатели совпадают с федеральными индикаторами по наименованию, единице измерения и логике расчёта;

- доля сопоставимых с федеральной системой показателей составляет от 10 до 50 %;

- ключевые направления развития определяются преимущественно региональными стратегическими приоритетами.

Примерами таких планов являются лесные планы Республики Карелия и Мурманской области. В данных регионах отдельные цели и показатели соответствуют федеральной политике, однако основная логика документов определяется спецификой регионального развития лесного комплекса.

3. Содержательно интегрированная связь региональных лесных планов с федеральной стратегией развития лесного комплекса.

В данном случае федеральная лесная политика становится одним из ключевых элементов

формирования системы целей, задач и показателей регионального лесного плана.

Измеримые признаки:

- в разделе «Цели и задачи» прямо указывается, что план разработан в целях реализации федеральной стратегии развития лесного комплекса и государственной лесной политики;

- большинство показателей лесного плана совпадает с федеральными стратегическими индикаторами по наименованию, единице измерения и логике расчёта;

- доля сопоставимых показателей превышает 50 %;

- региональные плановые значения представлены в динамике и позволяют оценивать вклад субъекта Российской Федерации в достижение федеральных стратегических ориентиров.

В качестве примера можно привести лесной план Архангельской области. В формулировках целей и задач данного документа прямо указывается необходимость реализации единой государственной политики в сфере управления лесными ресурсами, а система показателей в значительной степени сопоставима с федеральными стратегическими индикаторами.

Предложенная типология показывает, что региональные лесные планы субъектов Российской Федерации различаются по степени интеграции федеральной лесной политики. При наличии единой типовой формы документа регионы по-разному интерпретируют роль федеральных стратегических документов в системе регионального лесного планирования. В результате региональные планы формируют неоднородную систему стратегического управления лесным комплексом, что затрудняет сопоставление показателей регионального развития лесного хозяйства; агрегирование региональных данных на федеральном уровне; формирование единого Национального лесного плана Российской Федерации.

Различия в степени интеграции региональных лесных планов с федеральной стратегией развития лесного комплекса обусловлены совокупностью экономических, институциональных и управленческих факторов.

К числу ключевых экономических факторов относится роль лесного комплекса в структуре региональной экономики. В субъектах Российской Федерации с развитым лесопромышленным комплексом и высокой зависимостью экономики от лесозаготовки и переработки древесины (Архангельская область, Республика Коми, Вологодская область) лесные планы, как правило, более тесно связаны с федеральной стратегией, поскольку федеральные показатели напрямую коррелируют с экономическими интересами

региона. В таких субъектах значительное внимание уделяется вопросам инвестиционного развития, объемам заготовки древесины, развитию лесопереработки и бюджетной эффективности лесного комплекса.

Существенное влияние оказывают также институциональные факторы, включая степень вовлеченности региональных органов управления в реализацию федеральной лесной политики, наличие крупных инвестиционных проектов федерального уровня, а также уровень взаимодействия между региональными органами власти и федеральными структурами управления лесным хозяйством. В регионах, где лесной комплекс рассматривается как стратегически значимый сектор экономики, наблюдается более высокая степень интеграции региональных документов с федеральными стратегическими ориентирами.

Важную роль играют и особенности функционального использования лесов. В субъектах, где преобладают защитные, рекреационные и экологические функции лесов (Санкт-Петербург, Калининградская область), лесные планы в меньшей степени ориентированы на показатели промышленного освоения лесных ресурсов и, соответственно, имеют более ограниченную связь с федеральными экономическими приоритетами развития лесного комплекса.

Дополнительным фактором выступает пространственная и ресурсная неоднородность регионов, включая различия в лесистости территорий, транспортной доступности лесных ресурсов, структуре лесного фонда и уровне хозяйственного освоения лесов. Это приводит к формированию различных моделей регионального лесного планирования даже при наличии единой типовой структуры документов.

Таким образом, различия между региональными лесными планами обусловлены не только особенностями лесных ресурсов, но и различной экономической ролью лесного комплекса, институциональными условиями управления и функциональной специализацией лесов в субъектах Российской Федерации.

II. Различия в стратегических приоритетах регионов

Сравнение лесных планов субъектов СЗФО показывает, что при единой типовой форме документы отражают разные стратегические приоритеты, обусловленные спецификой территории, структурой экономики и характером использования лесов. Это проявляется не только в разделе «Цели и задачи», но и в разделах о перспективных направлениях использования лесов, инвестиционных проектах, рынках лесной продукции и допустимых видах лесопользования.

Анализ лесных планов субъектов СЗФО показывает, что при единой типовой форме документа стратегические приоритеты регионов существенно различаются. Например, в Вологодской области приоритет выражен через развитие инвестиционных проектов в области освоения лесов, создание перерабатывающих мощностей и внедрение «интенсивной модели использования и воспроизводства лесов» [18]. В Санкт-Петербурге, напротив, лесной план ориентирован на сохранение защитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и рекреационных функций лесов. В Республике Коми стратегическая логика плана выражена через «увеличение объема рубок лесных насаждений», «увеличение объемов платежей в бюджетную систему от использования лесов» и «создание современной конкурентоспособной лесной промышленности» [17]. В Архангельской области лесной план отражает приоритет лесопромышленного комплекса и «полную переработку заготовленной древесины» [15]. Тем самым единая стратегическая линия лесной политики на уровне документов субъектов фактически модифицируется под региональные экономические, территориальные и функциональные особенности.

III. Отсутствие единых показателей эффективности

Анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показывает, что при единой типовой структуре документов система показателей оценки эффективности лесного хозяйства существенно различается между регионами.

Федеральная лесная политика предполагает оценку эффективности развития лесного комплекса по нескольким ключевым направлениям:

- экономическая эффективность использования лесных ресурсов;
- устойчивость лесных экосистем;
- воспроизводство и восстановление лесов.

Однако региональные лесные планы используют разные наборы индикаторов, что проявляется в различиях перечня показателей, методах их расчёта и уровне детализации.

В лесных планах некоторых регионов основной акцент делается на экономических показателях, таких как объем заготовки древесины или платежи за использование лесов. В планах других регионов в приоритетном порядке

рассматриваются экологические функции лесов, включая сохранение защитных лесов и рекреационное использование территорий. Кроме того, показатели воспроизводства лесов могут представляться либо через площади лесовосстановления, либо через изменение структуры лесных насаждений.

Таким образом, единая система индикаторов эффективности лесного хозяйства на уровне региональных лесных планов фактически отсутствует.

Например, в лесном плане Республики Коми среди задач развития лесного хозяйства прямо указаны показатели, связанные с хозяйственным использованием лесов: «увеличение объема рубок лесных насаждений с 1 га занятых лесными насаждениями земель лесного фонда», «увеличение объемов платежей в бюджетную систему от использования лесов в расчёте на 1 га земель лесного фонда» [17]. Также в документе устанавливаются плановые объемы заготовки древесины: «Плановые показатели на 2020–2029 годы предусматривают увеличение установленных объемов заготовки древесины до 10,7 млн. м³» [17]. Таким образом, система показателей в данном плане ориентирована прежде всего на экономическую эффективность использования лесных ресурсов и развитие лесной промышленности.

В лесном плане Вологодской области среди ключевых характеристик развития лесного комплекса рассматриваются показатели инвестиционной активности: «в перечень приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов включены 25 проектов, объем вложенных инвестиций составляет 35 млрд. руб.» [18]. Также в документе подробно описываются инвестиционные проекты по созданию производств по переработке древесины, включая производство фанеры, пиломатериалов, пеллет и целлюлозно-бумажной продукции. Таким образом, в данном плане система показателей эффективности ориентирована на развитие инвестиционных проектов и промышленной переработки древесины. Сравнительный анализ показателей эффективности в лесных планах субъектов СЗФО представлен в таблице 2.

Сравнение лесных планов субъектов СЗФО показывает, что в региональных документах используется неоднородная система показателей оценки эффективности лесного хозяйства.

Природопользование

Таблица 2

Сравнительный анализ показателей эффективности в лесных планах субъектов СЗФО

Table 2

Comparative analysis of performance indicators in forest plans of the Northwestern Federal District subjects

Регион Region	Основные показатели, используемые в плане The main indicators used in the plan	Тип преобладающих показателей The type of prevailing indicators	Особенности системы показателей Features of the indicator system
Мурманская область Murmansk region	Допустимый объем изъятия древесины, мероприятия по охране лесов, воспроизводство лесов Permissible volume of timber removal, forest protection measures, forest reproduction	Экологические и ресурсные Environmental and resource issues	Сравнительно небольшая роль экономических показателей The relatively small role of economic indicators
Архангельская область Arkhangelsk region	Расчетная лесосека, объем заготовки древесины, развитие лесопромышленного комплекса Estimated cutting area, volume of timber harvesting, development of the timber industry	Ресурсные и экономические Resource and economic	Показатели тесно связаны с промышленным использованием лесов The indicators are closely related to the industrial use of forests
Республика Карелия Republic of Karelia	Объем рубок лесных насаждений, платежи от использования лесов, инвестиционные проекты The volume of logging, payments from the use of forests, investment projects	Экономические и ресурсные Economic and resource	Акцент на росте лесопромышленного комплекса Emphasis on the growth of the timber industry
Республика Коми Komi Republic	Объем заготовки древесины, платежи в бюджет от использования лесов, развитие лесной промышленности The volume of timber harvesting, payments to the budget from the use of forests, the development of the forestry industry	Экономические Economic	Показатели напрямую связаны с увеличением хозяйственного использования лесов The indicators are directly related to the increase in the economic use of forests
Вологодская область Vologda region	Инвестиционные проекты освоения лесов, объем инвестиций, развитие переработки древесины Forest development investment projects, volume of investments, development of wood processing	Инвестиционные и экономические Investment and economic	Большое внимание инвестиционным показателям Great attention is paid to investment indicators
Ленинградская область Leningrad region	Использование расчетной лесосеки, мероприятия по охране и защите лесов, инфраструктура Use of the estimated cutting area, measures for the protection and protection of forests, infrastructure	Смешанные Mixed	Сочетание хозяйственных и экологических показателей Combination of economic and environmental indicators
Новгородская область Novgorod region	Использование лесов по видам деятельности, воспроизводство лесов, инфраструктура Forest use by type of activity, forest reproduction, infrastructure	Ресурсные Resource-based	Показатели сосредоточены на использовании лесов The indicators focus on forest use

Природопользование

Псковская область Pskov region	Эффективность использования лесов, удовлетворение общественных потребностей в ресурсах леса Forest use efficiency, meeting public needs for forest resources	Экологические, часть целей сформулирована в качественной форме Environmental, some of the goals are formulated in a qualitative form	Значительная доля качественных формулировок A significant proportion of high-quality formulations
Калининградская область Kaliningrad region	Защитные функции лесов, рекреационное использование Protective functions of forests, recreational use	Экологические Environmental	Минимальная роль лесозаготовки The minimal role of logging
Ненецкий автономный округ Nenets Autonomous Area	Использование лесных ресурсов, охрана и защита лесов Use of forest resources, protection and protection of forests	Ресурсные Resource-based	Небольшая роль экономических индикаторов The small role of economic indicators
Санкт-Петербург Saint-Petersburg	Защитные функции лесов, рекреационные функции, санитарно-гигиенические функции	Экологические Environmental	Отсутствуют показатели хозяйственного использования лесов There are no indicators of economic use of forests

Источник: составлено авторами на основе данных [14-24].
Source: compiled by the authors based on data from [14-24].

Сравнение лесных планов субъектов СЗФО показывает, что в региональных документах используется неоднородная система показателей оценки эффективности лесного хозяйства.

Кроме того, в ряде лесных планов цели формулируются в качественной форме (например, «повышение эффективности использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов»), без указания количественных индикаторов достижения. В одних регионах основное внимание уделяется экономическим показателям освоения лесных ресурсов, в других – экологическим функциям лесов или инвестиционной активности лесного комплекса. При этом единый набор индикаторов, позволяющий

сопоставлять результаты реализации лесных планов между субъектами Российской Федерации, отсутствует.

В результате показатели региональных лесных планов не являются полностью сопоставимыми между собой, а также не всегда напрямую соотносятся с системой федеральной статистики и стратегических показателей развития лесного комплекса. Более подробно это можно увидеть в матрице показателей эффективности по всем 11 субъектам СЗФО, представленной в таблице 4.

Таблица 3

Матрица показателей эффективности в лесных планах субъектов СЗФО

Table 3

Matrix of performance indicators in forest plans of the subjects of the Northwestern Federal District

Регион Region	Расчетная лесосека Estimated logging area	Объем заготовки древесины Volume of wood harvesting	Платежи за использование лесов Payments for the use of forests	Инвестиционные проекты Investment projects	Развитие лесопереработки Development of timber processing	Площадь лесовосстановления Reforestation area	Охрана лесов Forest protection	Пожарная опасность Fire danger	Рекреационное использование Recreational use	Защитные функции лесов Protective functions of forests
Мурманская область Murmansk region	+	+	–	–	–	+	+	+	–	+

Природопользование

Архангельская область Arkhangelsk region	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
Республика Карелия Republic of Karelia	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
Республика Коми Komi Republic	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
Вологодская область Vologda region	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
Ленинградская область Leningrad region	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Новгородская область Novgorod region	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+
Псковская область Pskov region	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+
Калининградская область Kaliningrad region	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+
Ненецкий АО Nenets Autonomous District	+	–	–	–	–	+	+	+	–	+
Санкт-Петербург Saint-Petersburg	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+

Источник: составлено авторами на основе данных [14-24].

Source: compiled by the authors based on data from [14-24].

Матрица индикаторов лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показывает, что единая система оценки эффективности лесного хозяйства на региональном уровне фактически отсутствует. При этом различия проявляются в составе используемых показателей; в степени их детализации; в приоритетных направлениях оценки эффективности.

Экономические показатели (заготовка древесины, инвестиции, платежи) используются преимущественно в регионах с развитым лесопромышленным комплексом, тогда как в регионах с преобладанием защитных и рекреационных функций лесов такие показатели практически отсутствуют.

Анализ системы индикаторов и стратегических приоритетов лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа позволяет выделить четыре основные модели регионального лесного планирования – ресурсно-промышленную модель, смешанную ресурсно-экологическую модель, экологическую модель и ограниченно-ресурсную модель. Приведем более подробное описание каждой из них:

Ресурсно-промышленная модель – наиболее характерна для регионов, в которых одним из основных направлений экономики является лесной комплекс, включающим в себя максимальное вовлечение ресурсов в оборот, развитие глубокой переработки древесины и реализацию

инвестиционных проектов в отрасли лесопереработки.

Смешанная ресурсно-экологическая модель – отличается хозяйственным освоением лесов с одновременным учетом их экологических функций. Реализующие данную модель регионы ставят своей целью устойчивое развитие, опирающийся как на экономические, так и природоохранные аспекты.

Экологическая модель – фокусируется на сохранении и поддержании устойчивости лесных экосистем на основе развития средообразующих, рекреационных и санитарно-гигиенических функций лесов и минимизации процессов, связанных с использованием ресурсов (например, заготовка древесины).

Ограниченно-ресурсная модель – применяется на территориях, где леса не имеют первостепенного промышленного значения по причине неподходящих климатических условий или низкой продуктивности. Ключевые задачи в рамках данной модели нацелены на поддержание лесного хозяйства и организации использования ограниченных лесных ресурсов.

Согласно приведенному описанию моделей, их распределение по регионам будет выглядеть следующим образом:

1. Ресурсно-промышленная модель: Коми, Архангельская область, Карелия, Вологодская область;

2. Смешанная ресурсно-экологическая модель: Ленинградская область, Новгородская область, Псковская область;

3. Экологическая модель: Санкт-Петербург, Калининградская область;

4. Ограниченно-ресурсная модель: Мурманская область, Ненецкий АО.

Кластеризация субъектов СЗФО показывает, что региональные лесные планы реализуют различные модели лесного планирования, которые отличаются по: приоритетам использования лесных ресурсов, системе индикаторов эффективности и роли лесного комплекса в экономике региона.

Наличие нескольких моделей лесного планирования при формально единой структуре документов свидетельствует о неоднородности системы стратегического управления лесным хозяйством на уровне субъектов Российской Федерации. Все это существенно усложняет агрегирование региональных данных и формирование единой системы оценки эффективности лесной политики на национальном уровне.

IV. Разный уровень детализации экономической информации

Анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показывает, что экономические разделы документов существенно различаются по степени проработки. Несмотря на единую типовую структуру лесного плана субъекта Российской Федерации, уровень детализации экономических показателей, инвестиционных проектов и бюджетных поступлений в различных регионах неодинаков.

В одних субъектах экономический раздел содержит подробный анализ инвестиционной активности, структуры доходов от использования лесов, а также прогнозируемых поступлений в бюджеты различных уровней. В других регионах экономическая составляющая представлена значительно менее подробно и ограничивается общими характеристиками использования лесных ресурсов.

Например, в лесном плане Вологодской области экономический анализ представлен достаточно подробно. В документе рассматриваются инвестиционные проекты освоения лесов, объемы вложенных инвестиций и развитие лесоперерабатывающих производств. Например, в документе приводятся конкретные примеры инвестиционных проектов: «ООО «Плитвуд» реализует в п. Вохтога Грязовецкого района инвестиционный проект по созданию производства березовой фанеры... Объем инвестиций: 12,3 млрд. руб.»; «АО «Сокольский ЦБК» – инвестиционный проект по строительству новой бумагоделательной машины... Объем

инвестиций: 14,4 млрд. руб.» [18]. Помимо инвестиционных проектов, в плане анализируются экономические показатели развития лесного комплекса, включая доходы от использования лесов и прогнозируемые поступления в бюджетную систему. Таким образом, экономический раздел лесного плана Вологодской области содержит развернутый анализ развития лесопромышленного комплекса региона.

В лесном плане Республики Коми экономический блок также достаточно выражен, однако он ориентирован прежде всего на показатели хозяйственного использования лесных ресурсов. В документе отмечается: «увеличение объемов платежей в бюджетную систему от использования лесов в расчёте на 1 га земель лесного фонда» [17]. Кроме того, устанавливаются плановые показатели заготовки древесины: «Плановые показатели на 2020–2029 годы предусматривают увеличение установленных объемов заготовки древесины до 10,7 млн. м³» [17]. В то же время инвестиционные проекты и экономическая структура отрасли раскрыты менее детально, чем, например, в лесном плане Вологодской области.

Сравнение экономических разделов лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа, представленное в таблице 4, показывает, что уровень экономического анализа существенно различается между регионами.

Природопользование

Таблица 4

Сравнительный анализ уровней детализации экономических показателей, представленных в лесных планах регионов СЗФО

Table 4

Comparative analysis of the levels of detail of economic indicators presented in the forest plans of the regions of the Northwestern Federal District

Регион Region	Экономические показатели, указанные в лесном плане Economic indicators specified in the forest plan	Уровень детализации Level of detail
Вологодская область Vologda region	Инвестиционные проекты, объем инвестиций, развитие переработки древесины, доходы от использования лесов Investment projects, volume of investments, development of wood processing, income from the use of forests	Высокий High
Республика Коми Komi Republic	Объем заготовки древесины, платежи за использование лесов Volume of timber harvesting, payments for the use of forests	Средний Average
Архангельская область Arkhangelsk region	Развитие лесопромышленного комплекса, переработка древесины Development of the timber industry, wood processing	Средний Average
Республика Карелия Republic of Karelia	Инвестиционные проекты и развитие лесной промышленности Investment projects and development of the forest industry	Средний Average
Ленинградская область Leningrad region	Использование лесных ресурсов и инфраструктура Use of forest resources and infrastructure	Средний Average
Новгородская область Novgorod region	Использование лесов и отдельные экономические показатели Forest use and selected economic indicators	Ограниченный Limited
Псковская область Pskov region	Общие показатели эффективности использования лесов General indicators of forest use efficiency	Ограниченный Limited
Калининградская область Kaliningrad region	Практически отсутствуют экономические показатели There are practically no economic indicators	Низкий Low
Санкт-Петербург Saint-Petersburg	Экономические показатели практически отсутствуют Economic indicators are practically non-existent	Низкий Low
Мурманская область Murmansk region	Ограниченные показатели использования лесных ресурсов Limited forest resources utilization rates	Ограниченный Limited
Ненецкий автономный округ Nenets Autonomous Area	Минимальная экономическая информация Minimal economic information	Низкий Low

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Для демонстрации данных различий будут использоваться уровни детализации экономической информации, собранной и проанализированной в каждом регионе:

Высокий уровень – раздел содержит детальный анализ инвестиционной активности с перечислением конкретных проектов, объемов вложенных и планируемых инвестиций. Анализируется структура доходов от использования лесов, дается прогноз поступлений в бюджеты различных уровней, а также рассматриваются вопросы развития лесоперерабатывающих мощностей и рынков сбыта.

Средний уровень – экономические показатели присутствуют в разделе, но представлены менее детально. Основное внимание уделяется макроэкономическим показателям, таким как плановые и фактические объемы заготовки древесины, уровень освоения расчетной лесосеки,

объем платежей за использование лесов. Инвестиционные проекты могут упоминаться в общем виде или списком без глубокого финансово-экономического анализа.

Ограниченный уровень – информация представлена фрагментарно. В основном это общие показатели эффективности использования лесов или данные по использованию лесных ресурсов по видам деятельности без углубленного анализа экономической отдачи, инвестиционных процессов или бюджетной эффективности.

Низкий уровень – экономические показатели в лесном плане практически отсутствуют. Документ сосредоточен на характеристике лесных ресурсов, их экологических функциях и мероприятиях по охране и воспроизводству. Лесной план при этом не рассматривается как инструмент экономического развития.

Природопользование

В результате федеральные органы получают неоднородную экономическую информацию, что затрудняет сопоставление экономических показателей развития лесного комплекса между регионами и усложняет формирование единой системы стратегического планирования лесного хозяйства на национальном уровне.

V. Различия в подходах к стратегическому планированию

Анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показывает, что регионы по-разному используют данный документ в системе стратегического управления лесным хозяйством. Несмотря на единую типовую структуру лесного плана субъекта Российской Федерации, фактическая роль документа в управлении развитием лесного комплекса различается.

В ряде регионов лесной план используется как инструмент стратегического управления, включающий анализ инвестиционной активности, развитие инфраструктуры лесного комплекса и прогноз экономического развития отрасли. В таких документах лесной план выполняет функцию долгосрочного программного документа, определяющего направления развития лесопромышленного комплекса. В других субъектах лесной план выполняет преимущественно регламентирующую функцию, ограничиваясь характеристикой лесных ресурсов региона, описанием существующего состояния лесного

фонда и перечнем мероприятий по охране и воспроизводству лесов. В этих случаях стратегический компонент документа выражен значительно слабее.

Например, в лесном плане Вологодской области значительное внимание уделяется вопросам развития лесопромышленного комплекса и инвестиционной политики, а также отмечается внедрение новой модели лесного хозяйства: «Вологодская область наряду с другими регионами реализует пилотный проект по внедрению интенсивной модели использования и воспроизводства лесов» [18]. Таким образом, лесной план Вологодской области выступает как инструмент стратегического развития лесного комплекса региона.

В лесном плане Калининградской области основное внимание уделяется характеристике лесных ресурсов региона и мероприятиям по охране и воспроизводству лесов [22]. Экономические и инвестиционные аспекты развития лесного комплекса рассматриваются значительно менее подробно. В результате документ выполняет преимущественно регламентирующую и описательную функцию, а стратегические направления развития лесного комплекса региона представлены ограниченно. Сравнительный анализ лесных планов субъектов СЗФО позволяет выделить различия в роли лесного плана в системе стратегического управления лесным хозяйством и расхождения в использовании подходов к планированию, что отражено в таблице 5.

Таблица 5

Сравнительный анализ подходов к стратегическому планированию в регионах СЗФО

Table 5

Comparative analysis of approaches to strategic planning in the regions of the Northwestern Federal District

Регион Region	Подход к использованию лесного плана The approach to using the forest plan	Характер роли документа Functional role of the document
Вологодская область Vologda region	Анализ инвестиционных проектов, развитие переработки древесины, внедрение интенсивной модели лесного хозяйства Analysis of investment projects, development of wood processing, introduction of an intensive forestry model	Стратегический документ Strategic document
Республика Коми Komi Republic	Увеличение объемов лесозаготовки, развитие лесной промышленности Increased logging, development of the forestry industry	Стратегический документ Strategic document
Архангельская область Arkhangelsk region	Развитие лесопромышленного комплекса региона Increased logging, development of the forestry industry	Стратегический документ Strategic document
Республика Карелия Republic of Karelia	Развитие лесной промышленности и инвестиционных проектов Development of the forest industry and investment projects	Стратегический документ Strategic document
Ленинградская область Leningrad region	Сочетание хозяйственного использования и охраны лесов A combination of economic use and forest protection	Смешанный подход A mixed approach
Новгородская область Novgorod region	Использование лесных ресурсов и воспроизводство лесов Use of forest resources and reproduction of forests	Смешанный подход A mixed approach

Природопользование

Псковская область Pskov region	Преимущественно описание использования лесов Mainly a description of the use of forests	Ограниченно стратегический документ A limited strategic document
Мурманская область Murmansk region	Охрана и воспроизводство лесов Protection and reproduction of forests	Регламентирующий документ Regulatory document
Ненецкий автономный округ Nenets Autonomous Area	Ограниченное хозяйственное использование лесов Limited economic use of forests	Регламентирующий документ Regulatory document
Калининградская область Kaliningrad region	Описание лесных ресурсов и экологических функций Description of forest resources and ecological functions	Регламентирующий документ Regulatory document
Санкт-Петербург Saint-Petersburg	Сохранение защитных и рекреационных функций лесов Preservation of protective and recreational functions of forests	Регламентирующий документ Regulatory document

Источник: составлено авторами
Source: compiled by the authors

В результате можно сделать вывод, что лесные планы субъектов Российской Федерации имеют разную стратегическую направленность, что снижает сопоставимость региональных документов и усложняет формирование единой системы стратегического планирования лесного комплекса на национальном уровне.

Проведённый анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показывает, что разработка Национального лесного плана Российской Федерации должна быть ориентирована не только на формальное объединение региональных документов, но и на формирование единой системы стратегического управления лесным комплексом.

В первую очередь Национальный лесной план должен предусматривать унификацию системы показателей оценки эффективности лесного хозяйства. Проведённое исследование показало, что в действующих региональных лесных планах используются различные подходы к формированию показателей, различаются единицы измерения, методики расчёта и структура целевых индикаторов. В связи с этим необходимо формирование перечня обязательных федеральных индикаторов, используемых всеми субъектами Российской Федерации. К таким показателям могут относиться объём заготовки древесины, использование расчётной лесосеки, площадь лесовосстановления, объём платежей за использование лесов, показатели охраны лесов и уровень пожарной опасности.

Кроме того, Национальный лесной план должен обеспечивать более высокий уровень вертикальной интеграции системы стратегического планирования. Федеральные стратегические цели должны декомпозироваться на региональный уровень через систему обязательных целевых

ориентиров и сопоставимых показателей. При этом региональные лесные планы должны сохранять возможность учёта территориальной специфики, однако в рамках единой федеральной системы стратегических индикаторов.

Проведённый анализ также показывает необходимость унификации методических подходов к расчёту показателей и формированию прогнозных параметров развития лесного комплекса. В настоящее время различия в методиках оценки и структуре данных существенно затрудняют сопоставление результатов реализации лесных планов между регионами и ограничивают возможности формирования единой системы мониторинга.

Важным элементом Национального лесного плана должна стать система мониторинга и оценки достижения целевых показателей, обеспечивающая регулярное сопоставление плановых и фактических результатов. Это позволит повысить управляемость лесного комплекса и обеспечить обратную связь между федеральным и региональным уровнями управления.

Кроме того, результаты исследования показывают необходимость включения в структуру Национального лесного плана обязательного блока экономического анализа, содержащего показатели инвестиционного развития, бюджетной эффективности и уровня промышленного освоения лесных ресурсов. В настоящее время степень детализации экономических разделов региональных лесных планов существенно различается, что ограничивает возможности комплексной оценки эффективности государственной лесной политики.

Таким образом, разработка Национального лесного плана Российской Федерации должна быть ориентирована на создание единой методологической и информационной основы

стратегического управления лесным комплексом, обеспечивающей сопоставимость региональных данных, согласованность стратегических целей и повышение результативности государственной лесной политики.

Заключение

Проведённый анализ лесных планов субъектов Северо-Западного федерального округа показал, что при формально единой структуре документов региональные подходы к стратегическому планированию лесного хозяйства существенно различаются. Несмотря на использование типовой формы лесного плана субъекта Российской Федерации, содержание региональных документов демонстрирует значительную вариативность в постановке целей, выборе стратегических приоритетов и системе показателей оценки эффективности.

Выявленные различия проявляются прежде всего в степени интеграции федеральной лесной политики в региональные планы, стратегических приоритетах развития лесного комплекса, системе показателей эффективности и роли лесного плана в системе управления лесным хозяйством региона. В одних субъектах лесной план выступает как инструмент стратегического развития лесопромышленного комплекса, включающий анализ инвестиционных проектов и прогноз экономического развития отрасли, тогда как в других регионах документ выполняет

преимущественно регламентирующую функцию и ограничивается описанием состояния лесных ресурсов и мероприятий по их охране и воспроизводству.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что региональные лесные планы в настоящее время формируют неоднородную систему стратегического управления лесным комплексом. Это затрудняет сопоставление показателей развития лесного хозяйства между субъектами Российской Федерации, усложняет агрегирование региональных данных на федеральном уровне и ограничивает возможности формирования единой системы оценки эффективности государственной лесной политики.

Выявленные различия также свидетельствуют о необходимости совершенствования методологии разработки лесных планов субъектов Российской Федерации, унификации системы показателей эффективности и повышения степени интеграции региональных документов с федеральными стратегическими документами развития лесного комплекса. В перспективе это имеет важное значение для формирования единой системы стратегического планирования в лесном хозяйстве и разработки Национального лесного плана Российской Федерации как инструмента координации государственной лесной политики на федеральном и региональном уровнях.

Список литературы

1. Лесной кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 4 декабря 2006 г. № 200-ФЗ: с изменениями и дополнениями // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения: 19.03.2026).
2. Распоряжение Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года»: с изменениями и дополнениями // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_378918/ (дата обращения: 19.03.2026).
3. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 318 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства»: с изменениями и дополнениями // Правительство России: официальный сайт. URL: <http://government.ru/docs/all/137105/> (дата обращения: 19.03.2026).
4. Shvarts E.A., Karpachevskiy M.L., Shmatkov N.M., Baybar A.S. Reforming Forest Policies and Management in Russia: Problems and Challenges // *Forests*. 2023; 14 (8): 1524. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14081524>.
5. Gordeev R.V., Pyzhev A.I., Yagolnitser M.A. Drivers of Spatial Heterogeneity in the Russian Forest Sector: A Multiple Factor Analysis // *Forests*. 2021; 12 (12): 1635. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121635>.
6. Dobrynin D., Jarlebring N.Y., Mustalahti I., Sotirov M., Kulikova E., Lopatin E. The forest environmental frontier in Russia: Between sustainable forest management discourses and «wood mining» practice // *Ambio*. 2021; 50: 2138-2152. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01643-6>.
7. Якушева Т.В., Выродова С.А., Мосолова Н.А. Проблемы лесного планирования в разрезе лесных планов субъектов РФ и региональных программ развития лесного хозяйства // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. – 2024. – № 4. – С. 116-125. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2024.4.116>.
8. Ветров Л.С., Чернов М.В., Выродова С.А. Оценка лесного планирования регионального уровня и предложения по его совершенствованию // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. – 2022. – № 3. – С. 69-81. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.3.69>.

9. Петрунин Н.А. Проблемы стратегического планирования в области лесных отношений на региональном уровне // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2021. – № 1. – С. 4-31. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.1.4>.
10. Петрунин Н.А. Государственная статистическая и ведомственная отраслевая отчетность в лесном хозяйстве: проблемы и пути ее оптимизации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2021. – № 2. – С. 64-84. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.2.64>.
11. Третьяков А.Г. Экономическая доступность лесных древесных ресурсов как инструмент лесного планирования // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2021. – № 4. – С. 68-77. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.3.68>.
12. Кузьминов И.Ф., Лобанова П.А., Логинова И.В., Бахтин П.Д. Система научно-технологического прогнозирования и стратегического планирования в лесном комплексе Российской Федерации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2020. – № 1. – С. 54-73. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.1.54>.
13. Бечина И.В. Административно-правовой статус органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, уполномоченных в области лесных отношений // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2020. – № 4. – С. 65-79. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.4.65>.
14. Лесной план Мурманской области на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: <https://mpr.gov-murman.ru/upload/iblock/cff/eduxt0k23jl2f3vf07wjvcud99i3kk8f/Lesnoy-plan-1-tom.pdf> (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
15. Лесной план Архангельской области на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/462641881> (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
16. Лесной план Республики Карелия на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: https://ecology.gov10.ru/upload/iblock/cf4/Proekt-izmeneniy-v-Lesnoy-plan-Respubliki-Kareliya-na-2019_2028-gody.pdf (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
17. Лесной план Республики Коми на 2020-2029 годы. – 2019. – URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-browser%3A%2F%2F4DT1uXEPRrJRxiUFoewruK_OOJRe37XICMP2qBMHGUTroUWHUobbKZQySAokNcY2iKU0sg0m91_eRZMVgy4dkePEatXgEPJ2OMIgMhdo7XNrWOz7-NipVBp_-7Fg0K6Q3kdv7axXOGjbcDZsqK5j6g%3D%3D%3Fsign%3DTb6VumiTmTRsbBM0kgoeZmRHaGjdZwQZ1gWEBg6Ffa8%3D&name=lesnoy_plan_respubliki_komi_utverzhdenniy_2022_06_15_10_30_38.doc&nosw=1 (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
18. Лесной план Вологодской области на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: https://вологодская-область.рф/dokumenty/territorialnoe_planirovanie/lesnoy_plan_vologodskoy_oblasti/4152449/ (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
19. Лесной план Ленинградской области на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: https://lenobl.ru/media/npa/documents/2024/06/20/34-пг_141350.pdf (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
20. Лесной план Новгородской области на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: <https://minpriroda.novreg.ru/upload/medialibrary/1ac/a7vwb3gkdcarti712aplyv38vsrin2e4/Lesnoy%20план.pdf> (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
21. Лесной план Псковской области на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: <https://priroda.pskov.ru/lesnoy-plan> (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
22. Лесной план Калининградской области на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/390020181231000> (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
23. Лесной план Ненецкого автономного округа на 2019-2028 годы. – 2018. – URL: <https://disk.yandex.ru/d/0eFQaN9UjiTWMA> (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
24. Лесной план Санкт-Петербурга на 2025-2033 годы. – 2025. – URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/documents/2025/07/01/ЛЕСНОЙ_ПЛАН_Курортный_лесопарк_Итог_1_этап.pdf (дата обращения: 11.03.2026). – Текст: электронный.
25. Федеральный закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации»: с изменениями и дополнениями // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841/ (дата обращения: 19.03.2026).
26. Распоряжение Правительства РФ от 26 сентября 2013 г. № 1724-р «Об утверждении Основ государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года» // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152685/ (дата обращения: 19.03.2026).

References

1. *Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federatsii: Federal'nyi zakon № 200-FZ ot 4 dekabrya 2006 g., s izmeneniyami i dopolneniyami*. [Forest Code of the Russian Federation: Federal Law № 200-FZ of December 4, 2006, as amended and supplemented]. ConsultantPlus legal reference system. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (accessed 19.03.2026) (In Russ.).
2. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii № 312-r ot 11 fevralya 2021 g. «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda», s izmeneniyami i dopolneniyami*. [Order of the Government of the Russian Federation № 312-r of February 11, 2021 “On approval of the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030”, as amended and supplemented]. ConsultantPlus legal reference system. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_378918/ (accessed 19.03.2026). (In Russ.).
3. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii № 318 ot 15 aprelya 2014 g. «Ob utverzhdenii gosudarstvennoi programmy Rossiiskoi Federatsii “Razvitie lesnogo khozyaistva”», s izmeneniyami i dopolneniyami*. [Resolution of the Government of the Russian Federation № 318 of April 15, 2014 “On approval of the State Program of the Russian Federation ‘Development of Forestry’”, as amended and supplemented]. Government of Russia official website. URL: <http://government.ru/docs/all/137105/> (accessed 19.03.2026). (In Russ.).
4. Shvarts E.A., Karpachevskiy M.L., Shmatkov N.M., Baybar A.S. Reforming Forest Policies and Management in Russia: Problems and Challenges. *Forests*, 2023; 14 (8): 1524. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14081524>.
5. Gordeev R.V., Pyzhev A.I., Yagolnitsker M.A. Drivers of Spatial Heterogeneity in the Russian Forest Sector: A Multiple Factor Analysis. *Forests*, 2021; 12 (12): 1635. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121635>.
6. Dobrynin D., Jarlebring N.Y., Mustalahti I., Sotirov M., Kulikova E., Lopatin E. The forest environmental frontier in Russia: Between sustainable forest management discourses and “wood mining” practice. *Ambio*, 2021; 50: 2138–2152. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01643-6>.
7. Yakusheva T.V., Vyrodova S.A., Mosolova N.A. *Problemy lesnogo planirovaniya v razreze lesnykh planov sub'ektov RF i regional'nykh programm razvitiya lesnogo khozyaistva*. [Problems of forest planning in the context of forest plans of constituent entities of the Russian Federation and regional forestry development programs]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*. = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2024; 4: 116–125. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2024.4.116>.
8. Vetrov L.S., Chernov M.V., Vyrodova S.A. *Otsenka lesnogo planirovaniya regional'nogo urovnya i predlozheniya po ego sovershenstvovaniyu*. [Assessment of regional forest planning and proposals for its improvement]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*. = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2022; 3: 69–81. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.3.69>.
9. Petrunin N.A. *Problemy strategicheskogo planirovaniya v oblasti lesnykh otnoshenii na regional'nom urovne*. [Problems of strategic planning in the field of forest relations at the regional level]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*. = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2021; 1: 4–31. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.1.4>.
10. Petrunin N.A. *Gosudarstvennaya statisticheskaya i vedomstvennaya otraslevaya otchetnost' v lesnom khozyaistve: problemy i puti ee optimizatsii*. [State statistical and departmental reporting in forestry: problems and ways of optimization]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*. = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2021; 2: 64–84. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.2.64>.
11. Tret'yakov A.G. *Ekonomicheskaya dostupnost' lesnykh drevesnykh resursov kak instrument lesnogo planirovaniya*. [Economic accessibility of forest timber resources as a tool of forest planning]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*. = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2021; 4: 68–77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.3.68>.
12. Kuz'minov I.F., Lobanova P.A., Loginova I.V., Bakhtin P.D. *Sistema nauchno-tehnologicheskogo prognozirovaniya i strategicheskogo planirovaniya v lesnom komplekse Rossiiskoi Federatsii*. [System of scientific and technological forecasting and strategic planning in the forest complex of the Russian Federation]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*. = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2020; 1: 54–73. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.1.54>.
13. Bechina I.V. *Administrativno-pravovoi status organov ispolnitel'noi vlasti sub'ektov Rossiiskoi Federatsii, upolnomochennykh v oblasti lesnykh otnoshenii*. [Administrative and legal status of executive authorities of constituent entities of the Russian Federation authorized in the field of forest relations]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*. = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2020; 4: 65–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.4.65>.

14. *Lesnoi plan Murmanskoi oblasti na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Murmansk Region for 2019–2028]. 2018. URL: <https://mpr.gov-murman.ru/upload/iblock/cff/eduxt0k23jl2f3vf07jwvcud99i3kk8f/Lesnoy-plan-1-tom.pdf> (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
15. *Lesnoi plan Arkhangel'skoi oblasti na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Arkhangelsk Region for 2019–2028]. 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/462641881> (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
16. *Lesnoi plan Respubliki Kareliya na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of the Republic of Karelia for 2019–2028]. 2018. URL: https://ecology.gov10.ru/upload/iblock/cf4/Proekt-izmeneniy-v-Lesnoy-plan-Respubliki-Kareliya-na-2019_2028-gody.pdf (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
17. *Lesnoi plan Respubliki Komi na 2020–2029 gody*. [Forest Plan of the Komi Republic for 2020–2029]. 2019. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-browser%3A%2F%2F4DT1uXEPRrJRXIUfoewruK_OOJRe37XICMP2qBMHGUTroUWHUobbKZQySAokNcY2iKU0sg0m91_eRZMVgy4dkePEatXgEPJ2OMIgMhdo7XNrWOz7-NipVBp_-7Fg0K6Q3kdv7axXOgjbcdZsqK5j6g%3D%3D%3Fsign%3DTb6VumiTmTRsbBM0kgoeZmRHaGjdZwQZ1gWEBg6Ffa8%3D&name=lesnoy_plan_respubliki_komi_utverzhdenniy_2022_06_15_10_30_38.doc&nosw=1 (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
18. *Lesnoi plan Vologodskoi oblasti na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Vologda Region for 2019–2028]. 2018. URL: https://вологодская-область.рф/dokumenty/territorialnoe_planirovanie/lesnoy_plan_vologodskoy_oblasti/4152449/ (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
19. *Lesnoi plan Leningradskoi oblasti na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Leningrad Region for 2019–2028]. 2018. URL: https://lenobl.ru/media/npa/documents/2024/06/20/34-пр_141350.pdf (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
20. *Lesnoi plan Novgorodskoi oblasti na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Novgorod Region for 2019–2028]. 2018. URL: <https://minpriroda.novreg.ru/upload/medialibrary/1ac/a7vwb3gkdcarti712aplyv38vsrin2e4/Лесной%20план.pdf> (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
21. *Lesnoi plan Pskovskoi oblasti na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Pskov Region for 2019–2028]. 2018. URL: <https://priroda.pskov.ru/lesnoy-plan> (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
22. *Lesnoi plan Kaliningradskoi oblasti na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Kaliningrad Region for 2019–2028]. 2018. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/3900201812310001> (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
23. *Lesnoi plan Nenetskogo avtonomnogo okruga na 2019–2028 gody*. [Forest Plan of Nenets Autonomous Okrug for 2019–2028]. 2018. URL: <https://disk.yandex.ru/d/0eFQaN9UjiTWMA> (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
24. *Lesnoi plan Sankt-Peterburga na 2025–2033 gody*. [Forest Plan of Saint Petersburg for 2025–2033]. 2025. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/documents/2025/07/01/ЛЕСНОЙ_ПЛАН_Курортный_лесопарк_Итог_1_этап.pdf (accessed 11.03.2026). (In Russ.).
25. *Federal'nyi zakon № 172-FZ ot 28 iyunya 2014 g. «O strategicheskoy planirovani v Rossiiskoy Federatsii», s izmeneniyami i dopolneniyami*. [Federal Law № 172-FZ of June 28, 2014 “On Strategic Planning in the Russian Federation”, as amended and supplemented]. ConsultantPlus legal reference system. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841/ (accessed 19.03.2026). (In Russ.).
26. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii № 1724-r ot 26 sentyabrya 2013 g. «Ob utverzhdenii Osnov gosudarstvennoy politiki v oblasti ispol'zovaniya, okhrany, zashchity i vosproizvodstva lesov v Rossiiskoy Federatsii na period do 2030 goda»*. [Order of the Government of the Russian Federation № 1724-r of September 26, 2013 “On Approval of the Fundamentals of State Policy in the Field of Use, Protection, Conservation and Reproduction of Forests in the Russian Federation for the Period until 2030”]. ConsultantPlus legal reference system. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152685/ (accessed 19.03.2026). (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Литвинова Наталья Александровна* – младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела экономических исследований ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, преподаватель факультета технологического менеджмента и инноваций Университета ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3355-7967>, e-mail: hinode-nata@mail.ru.

Изотова Анна Гиевна – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела экономических исследований ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, преподаватель факультета технологического менеджмента и инноваций Университета ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-5066>, e-mail: izotovaanna411@gmail.com.

Гаврилюк Елена Сергеевна – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела экономических исследований ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., д. 21, г. Санкт-Петербург, Российская

Природопользование

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@gmail.com.

Бурцев Даниил Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий 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: forest1641@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Natalia A. Litvinova* – Junior Researcher, Scientific Research Department of Economic Research, Saint Petersburg Research Institute of Forestry, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, University lecturer, Faculty of Technological Management and Innovations, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, Saint Petersburg, Russian Federation, 197101, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3355-7967>, e-mail: hinode-nata@mail.ru.

Anna G. Izotova – Cand. Sci. (Econ.), Senior Researcher, Scientific Research Department of Economic Research, Saint Petersburg Research Institute of Forestry, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, University lecturer, Faculty of Technological Management and Innovations, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, Saint Petersburg, Russian Federation, 197101, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-5066>, e-mail: izotovaanna411@gmail.com.

Elena S. Gavriluk – Cand. Sci. (Econ.), Senior Researcher, Scientific Research Department of Economic 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@gmail.com.

Daniil S. Burtcev – Cand. Sci. (Agric.), Leading Researcher at the Climate Change Research Department 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: forest1641@gmail.com.

✉ Для контактов / Corresponding author



Механизм формирования сточных вод с искусственных зеленых площадок урбанизированных территорий

Дарья И. Мазурик ✉, mazurikdi@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3550-6062>

Алла Б. Дягилева, abdiag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5983-4550>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095, Российская Федерация

В работе проведен анализ формирования качества сточных вод с искусственных зеленых зон на урбанизированных территориях. Рассмотрены механизмы миграции загрязняющих веществ в этих системах. Для оценки качества сточных вод использовалась открытая информация, с учетом региональной специфики функционирования этих объектов и собственные экспериментальные исследования на модельной системе. Анализ научно-технической литературы показал, что при некоторой универсальности модели сложения этих объектов специфика формирования фильтрационных вод может существенно различаться. Состав воды зависит от климатических условий и целевой функции, конструктивных особенностей и состава вмещающих слоёв. Однако, в определенной климатической зоне с использованием единого алгоритма заложения слоев можно достигнуть универсальности формирования сточных вод для организации его повторного использования. Экспериментально установлено, что сточные воды спортивного поля являются слабозагрязненными при установившемся режиме фильтрации (среднестатистические значения БПК₅ составляют $181 \pm 17,0$ мгО₂/дм³, ХПК – $385 \pm 54,0$ мгО₂/дм³), что укладывается в требования договора для сброса этой воды в городскую канализацию. Для прямых водопользователей таких систем необходима дополнительная очистка. В ходе аналитического обзора выявлена принципиальная технологическая аналогия конструкций спортивного поля и биологически активного слояполигона, формируемого на завершающей стадии его биологической рекультивации. Таким образом, модель (почвенный слой- мембрана – дренаж) можно использовать в качестве объекта исследования для отработки управляемого механизма формирования почвенных слоев для более сложных природоподобных систем. Полученные данные позволят прогнозировать характеристики основного стока при проектировании и эксплуатации искусственных зеленых зон. Практическая значимость работы заключается в расширении представлений по реализации природоподобного проектирования на урбанизированных территориях и при рекультивации лесных массивов после техносферного воздействия различного характера.

Ключевые слова: искусственные зеленые зоны, качество сточных вод, дренажные системы, экологический каркас, спортивная площадка, почвенно-растительный слой, геохимический барьер

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мазурик, Д. И. Механизм формирования сточных вод с искусственных зеленых площадок урбанизированных территорий / Д. И. Мазурик, А. Б. Дягилева // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 280–293. – Библиогр.: с. 289–293 (31 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/18>.

Поступила 27.02. 2026. Пересмотрена 12.05. 2026. Принята 15.05. 2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026.

The mechanism of wastewater formation from artificial green areas in urbanized territories

Darya I. Mazurik ✉, mazurikdi@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3550-6062>

Alla B. Dyagileva, abdiag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5983-4550>

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, Saint Petersburg, Russia, 198095, Russian Federation

Abstract

The work presents an analysis of the formation of wastewater quality from artificial green zones in urbanized territories. The mechanisms of migration of pollutants in these systems are considered. To assess the quality of wastewater, open information was used, taking into account the regional specifics of the functioning of these objects, and own experimental studies on a model system. An analysis of scientific and technical literature has shown that, with some universality of the model of composition of these objects, the specificity of the formation of filtration waters can differ significantly. The composition of water depends on climatic conditions and the target function, design features and the composition of the enclosing layers. However, in a certain climatic zone, using a single algorithm for laying layers, it is possible to achieve universality of the formation of wastewater for the organization of its reuse. It has been experimentally established that wastewater from a sports field is slightly polluted under steady-state filtration conditions (average statistical values of BOD₅ are 181 ± 17.0 mg O₂/dm³, COD – 385 ± 54.0 mg O₂/dm³), which meets the requirements of the contract for the discharge of this water into the city sewer. Direct water users of such systems require additional treatment. During the analytical review, a fundamental technological analogy was revealed between the structures of a sports field and the biologically active layer of a landfill, formed at the final stage of its biological reclamation. Thus, the model (soil layer – membrane – drainage) can be used as an object of study for developing a controlled mechanism for the formation of soil layers for more complex nature-like systems. The obtained data will make it possible to predict the characteristics of the main runoff during the design and operation of artificial green zones. The practical significance of the work lies in expanding the understanding of the implementation of nature-like design in urbanized territories and during the reclamation of forest areas after technogenic impacts of various nature.

Keywords: *artificial green zones, wastewater quality, drainage systems, ecological framework, sports field, soil and vegetation layer, geochemical barrier*

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

For citation: Mazurik D. I., Dyagileva A. B. (2026) The mechanism of wastewater formation from artificial green areas in urbanized territories. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 280–293 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/18>.

Received 27.02.2026.

Revised 12.05.2026.

Accepted 15.05.2026.

Published online 26.06.2026

Введение

Современные тенденции организации жизненного пространства для населения и реализация национальных проектов, таких как «Экология» [1] и «Комфортная среда обитания» [2], формируют новый подход к градостроительству в условиях интенсивной урбанизации. Эти проекты объединяет необходимость создания и регулирования искусственных зеленых зон для решения многих социально-экологических и экономических задач. К числу таких объектов относятся спортивные газоны, озелененные пространства, а также защитные экраны на объектах накопленного экологического ущерба. Все эти элементы объединяет общность инженерно-технологических подходов к их организации, базирующихся на принципах природообустройства

и регулирования почвенно-растительного слоя, что соответствует современной зеленой инфраструктуре [3].

Инженерное развитие «зелёной» инфраструктуры городских агломераций порождает новую экологическую проблему – специфический сток с вновь организованных территорий. Качество и объём данного стока необходимо оценивать с учетом специфики сложения почвенных слоев. На

основе этой оценки принимается решение о его дальнейшем отведении в систему очистки либо использовании в целях регулирования водного режима урбанизированной территории. В настоящее время вопрос организации водосбора с искусственных зеленых территорий остается недостаточно проработанным. При этом для

сложившихся территорий решение этой задачи достаточно сложное и требует капитальных затрат с разделением выделенных потоков в самостоятельные сточные воды.

Современная застройка, в том числе уплотненная, и массовая организация новых пространств, как в промышленной зоне, так и жилой, требует нового подхода, что отмечается во многих научных работах [4-9]. Жесткие требования к качеству поверхностных сточных вод заставляют разрабатывать новые технологические решения как к формированию самих зеленых зон, так и к организации системы сбора и использования локально очищенных вод.

Анализ действующей нормативной базы показывает, что существующие рекомендации ВОДГЕО ориентированы преимущественно на расчет объемов и качества поверхностного ливневого стока с усредненных городских территорий. Они не учитывают специфику фильтрационных процессов, протекающих в многослойной конструкции, что ставит под сомнение релевантность их применения для современных урбанизированных объектов [10]. Это связано, в том числе, с применением разнородных искусственных грунтов, в составе которых могут присутствовать различные фракции отходов, включая отходы лесопромышленного комплекса (ЛПК) [11,12], что может кардинально менять состав и свойства формирующихся почвенных и фильтрационных вод. Для каждого региона подбор составляющих системы может варьироваться, поэтому качество поверхностных и фильтрационных вод, собираемых с соответствующих территорий, претерпевает изменения.

Проблема регионального нормирования качества фильтрационных вод осложняется отсутствием единой методической базы для оценки миграции загрязняющих веществ в многослойных искусственных системах. Существующие подходы к нормированию ориентированы на традиционные почвенные разрезы и не учитывают специфику техногенных грунтов, характеризующихся иными фильтрационными свойствами и сорбционной емкостью [13,14]. Кроме того, при создании искусственных зеленых зон широко применяются материалы, содержащие органические и минеральные компоненты, способные к трансформации в процессе эксплуатации. Это приводит к тому, что качество фильтрационных вод может изменяться во времени.

Проектирование зеленых зон тесно связано с экологическим каркасом [15,16] территорий, обеспечивающим эколого-социальную и ресурсную стабильность природно-технической системы. Накопленный опыт этих объектов позволяет выдвигать принципиально новые подходы к системе

эксплуатации зеленых каркасов современных агломераций. Особое значение это приобретает для объектов, которые потеряли промышленное значение и требуют рекультивации, в том числе с организацией новых зеленых площадок без дополнительного выноса загрязняющих веществ в результате предыдущей хозяйственной деятельности [17,18]. Такие объекты необходимо рассматривать как единую, многофункциональную инженерно-экологическую инфраструктуру, с выделенными потоками специфических сточных вод с этих преобразованных промышленных площадок. По сути, она является основой природно-урбанизированной надсистемой городской застройки [19,20], в том числе моногородов с градообразующими предприятиями к которым относится ЛПК и природных территорий с накопленным экологическим ущербом, включая системы организации полигонов ТКО на стадии рекультивации.

На основе научной литературы, касающейся проектирования зеленых зон в различных регионах [21-23], отмечается, что зеленая инфраструктура относится к стратегическому ресурсу, который является многофункциональным и управляемым ресурсным комплексом, ключевым фактором экологической безопасности и социально-экономической устойчивости, определяющим благополучие территории. Современные исследования в области природоподобных технологий подтверждают, что системы, основанные на использовании растительного покрова и почвенных слоев, эффективны при условии учета региональных особенностей и конструктивных параметров [24,25].

Накопленный опыт функционирования зеленых каркасов позволяет выдвигать гипотезу о том, что несмотря на различие в целевых функциях, существует принципиальная технологическая аналогия в устройстве искусственных зеленых зон. Данная аналогия обусловлена общностью инженерно-технологических подходов к формированию многослойного почвенно-растительного слоя и определяет сходство ступенчатого механизма формирования фильтрационных вод. Это позволяет рассматривать хорошо изученный объект (спортивное поле) в качестве аналитической модели для прогнозирования и управления качественными характеристиками стока на объектах накопленного экологического ущерба.

Целью данной работы является систематизация конструктивных особенностей искусственных зеленых зон и оценка механизма образования фильтрационных вод, которые необходимо отвести с этих территорий для определения возможного последующего целевого применения.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объектом исследования являются искусственные зеленые площадки, расположенные в Северо-Западном регионе и функционирующие в структуре городских агломераций. В работе рассматривались две категории природно-технических систем. К первой категории отнесены инженерные сооружения биологической очистки (поля фильтрации, поля орошения и биоплато), регламентированные ГОСТом Р 58594-2019. Оценка качества сточных вод с данных объектов проводилась на основе анализа региональных отчетных материалов, а также по результатам контрольных измерений, системы сельскохозяйственного назначения в работу не включались. Ко второй категории отнесены инженерные сооружения стандартизированных спортивных площадок, организованных согласно СП 332.1325800.2017, а также биологический слой после рекультивации полигона, в соответствии с ГОСТ Р 55985-2014. Для отработки составов и режимов дополнительно применялись модельные системы искусственного почвенного слоя, позволяющие проводить контролируемые лабораторные эксперименты.

Предметом исследования являются фильтрационные воды, формирующиеся при прохождении атмосферных осадков и поливных вод через искусственные почвенно-растительные слои перечисленных объектов.

Сбор и анализ данных

Основу исследования составил сравнительный анализ научно-технической документации и отчетных материалов по эксплуатации анализируемых объектов. Отбор проб фильтрационных вод производился в период с мая по октябрь 2024 года, в соответствии с графиком производственного экологического контроля. Всего было отобрано и статистически обработано 14 проб, кратность отбора составляла 2 раза в месяц. Отбор осуществлялся после выпадения осадков более 10 мм в сутки, что позволяло оценить качество стока в условиях установившегося режима фильтрации. Анализ проб фильтрационных вод выполнялся по следующим показателям: взвешенные вещества, водородный показатель (рН), химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПК₅). Определение проводилось по стандартным методикам, принятым в системе экологического контроля.

Для оценки потенциального состава фильтрационных вод и последующего сравнения с натурным дренажным стоком использовали водную вытяжку из товарного почвогрунта. Приготовление вытяжки выполнялось по ГОСТу 26423-85 при соотношении 1:5 (почва: дистиллированная вода) по массе, время контакта составило 24 часа при

температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Полученную вытяжку анализировали по тем же интегральным показателям, что и фильтрационные пробы.

Экспериментальная часть работы выполнялась на базе межкафедральной лаборатории СПбГУПТД ВШТЭ и на объектах городской инфраструктуры. Обработка результатов проводилась с использованием математической программы Excel. Статистическую значимость различий между показателями оценивали с помощью t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Организация зеленых зон в городах России регламентируется сводами правил (СП 104-103-00, СП 42.13330.2016) и санитарными нормами (СанПиН 2.1.3684-21), регулирующими требования к озеленению. В этих документах содержатся требования к качеству почв, водных объектов и атмосферного воздуха, что по сути является локальными правилами благоустройства и организации этих пространств. При анализе ряда паспортов благоустройства [26,27], а также при проведении экспертизы ряда объектов по рекультивации и эксплуатации полигонов, выявлена вариabельность подходов, обусловленная определенной климатической зоной, историко-культурными традициями, ландшафтными особенностями и экономическими возможностями выбранных регионов. Однако, действие указанных нормативных требований распространяется преимущественно на стандартные условия проектирования и в полной мере не учитывает всю сложность задач, возникающих при создании искусственных зеленых зон на объектах накопленного экологического ущерба. В таких случаях универсальные проектные решения могут вступать в противоречие с необходимостью изоляции загрязненных грунтов и организации сбора специфических фильтрационных вод.

В таблице 1 приведен обобщенный сравнительный анализ подходов и проблем при создании зеленых зон в городах Северо-Западного региона, систематизированный по климатическим зонам с реализуемыми инженерными решениями для каждой группы городов. Анализ показывает, что организация таких зон сопряжена с необходимостью использования привозных почвогрунтов и субстратов, поскольку естественные почвы характеризуются низким плодородием, повышенной кислотностью и переувлажнением. Состав и объем искусственных грунтов варьируются в зависимости от климатических условий: в Арктической зоне обязательны антифризные добавки и теплоизоляционные прослойки, тогда как в умеренно-континентальном климате ключевым требованием является

Природопользование

обеспечение дренажа и водоотведения. Специфика инженерных решений также вариативна: от создания ветрозащитных кулис в приморских

городах до обязательного устройства пластового дренажа в зонах с высоким уровнем грунтовых вод.

Таблица 1

Влияние климатических условий на выбор технологических решений при создании зеленых зон
Северо-Западного региона

Table 1

The impact of climate conditions on the choice of technological solutions for creating green areas
in the North-Western region

Климатическая зона Climate zone	Город city	Почва soil	Инженерные решения Engineering solutions	Проблемы problems
Умеренно-континентальная Temperate continental,	Санкт-Петербург, Великий Новгород St. Petersburg, Veliky Novgorod	подзолистые и болотные типы, торфо-песчано-суглинистые смеси podzolic and marshy types, peat-sand-loam mixtures	пластовый дренаж глубиной 0,8–1,2 м с уклоном, оборотные системы очистки, разделительная прослойка, устройство принудительной вентиляции почвенного слоя layer drainage with a depth of 0.8-1.2 m and a slope, recirculating cleaning systems, a separating layer, and a device for forced ventilation of the soil layer	переувлажнение, высокий уровень грунтовых вод, высокая рекреационная нагрузка waterlogging, high groundwater levels, and high recreational pressure
Умеренно-морская Moderate-marine	Калининград Kaliningrad	дерново-подзолистые, слабокислые, песчаные и супесчаные sod-podzolic, slightly acidic, sandy, and loamy soils	пластовый дренаж глубиной 0,8–1,0 м, ветрозащитные экраны высотой 2–3 м, известкование для нейтрализации кислотности layer drainage with a depth of 0.8-1.0 m, windbreaks with a height of 2-3 m, and liming to neutralize acidity	высокая влажность воздуха, частые осадки и туманы, кислые почвы high humidity, frequent precipitation and fog, and acidic soil
Умеренно-континентальная Temperate continental	Вологда, Псков Vologda, Pskov	дерново-подзолистые, супесчаные и суглинистые sod-podzolic, sandy loam, and loamy soils	дренаж закрытого типа с глубиной заложения 0,7–1,0 м, ветрозащитные полосы из древесно-кустарниковых пород, использование местных грунтов с улучшением (внесение торфа и песка) closed-type drainage with a depth of 0.7-1.0 m, windbreaks made of woody and shrubby plants, and the use of local soils with improvements (addition of peat and sand)	значительные сезонные перепады температуры, промерзание почвы, эрозия significant seasonal temperature fluctuations, soil freezing, and erosion
Приморская Primorskaya	Архангельск, Северодвинск Arkhangelsk, Severodvinsk	подзолистые, песчаные и супесчаные, холодные, малоплодородные podzolic, sandy and loamy, cold, and low-fertile	многоярусные ветрозащитные полосы, укрепление песчаных грунтов с заполнением растительным грунтом, снегозадерживающие устройства multi-tiered windbreaks, reinforcement of sandy soils with filling with plant soil, and snow-retaining devices	сочетание морских ветров с континентальными морозами, засоление почвы, длительный снежный покров combination of sea winds and continental frosts, soil salinity, and long snow cover

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculation

Основные проблемы, при организации зеленых зон, возникают на стыке природных

ограничений и интенсивного антропогенного воздействия. Таким образом, данные таблицы

подтверждают, что не существует единой универсальной модели организации зеленой зоны; технологическое решение адаптируется не только к климатической зоне, но и к локальным гидрогеологическим условиям, что согласуется с принципами устойчивого развития.

Климатические условия определяют не только выбор почвогрунтов и ассортимента растений, но и требования к инженерному обеспечению водного режима. Поэтому при проектировании зеленого каркаса урбанизированных территорий необходимо учитывать особенности управления водным балансом. Это является составной частью ее устойчивости, продуктивности и функционального назначения. Ключевым аспектом в этой системе является правильная организация сбора, использования и отвода избыточных ливневых и дренажных вод с данной территории. Механизм формирования этих потоков носит искусственно-естественный характер и зависит от периода эксплуатации конкретного объекта. В разных климатических зонах количество образующихся осадков существенно варьируется, соответственно изменяется и общее балансовое соотношение. Баланс и качество воды определяются комплексом показателей [28], учитывающим природные факторы, инженерные параметры создаваемых и фоновых систем.

Для эффективного управления этими потоками и предотвращения переувлажнения на искусственных площадках применяются дренажные системы. Они являются неотъемлемым элементом «зеленой» инфраструктуры, обеспечивающим сохранность поверхностного почвенного слоя и целостность всей зеленой зоны.

Устройство, расчет и конструктивные особенности дренажных систем регламентируются рядом нормативных документов (СП 32.13330.2018). В соответствии с ними основными параметрами при проектировании систем сбора и отведения являются объем и расход воды, определяемые с учетом климатических характеристик. При этом необходимо учитывать особенности организации вмещающих слоев и формирующуюся специфическую биомассу растений, которые используются для закрепления почвенного слоя в зависимости от региональных особенностей.

Эффективность работы дренажа и качество отводимого стока напрямую зависят от процессов, происходящих в верхних слоях системы. Механизм формирования сточных вод носит ступенчатый характер и определяется взаимодействием нескольких факторов. Вода, просочившаяся сквозь почвенный горизонт, теряет значительную часть взвешенных веществ, но обогащается подвижными водорастворимыми компонентами, прошедшими

сквозь сорбционный барьер или образовавшимися в результате биохимической трансформации. Этот фильтрат поступает в пластовый дренаж, где происходит его аккумуляция и транспортировка к дренажным трубам. При этом качество сточных вод по ряду химических показателей, на этом этапе, может изменяться за счет процессов выщелачивания минеральных компонентов из дренирующих материалов, это может наблюдаться особенно в период начала эксплуатации системы.

Выбор схемы дренажной системы для искусственных зеленых зон зависит от целевой функции объекта. Классическая система пластового дренажа используется для спортивных полей и интенсивно используемых газонов. Основная задача данной системы максимально быстро принять и отвести водный поток, предотвращая переувлажнение поверхностного слоя. Система почвенной фильтрации и дренажа применяется на полях фильтрации и экологически ориентированных объектах, где акцент делается на обеспечении длительного контакта воды с почвенным слоем. Технологические схемы таких объектов в основе содержат обобщенные конструктивные характеристики такие как: дерновой покров и растительный слой под определенным углом наклона, слой плодородного почвогрунта, изолирующие слои и систему перфорированных труб. На рисунке 1 представлена типовая схема послойного строения искусственной зеленой зоны с дренажной системой, с указанием диапазона мощностей слоев, демонстрирующая данный принцип. В зависимости от целевого назначения объекта и гидрогеологических условий состав, мощность отдельных слоев и угол наклона могут варьироваться, однако общая последовательность заложения сохраняется.

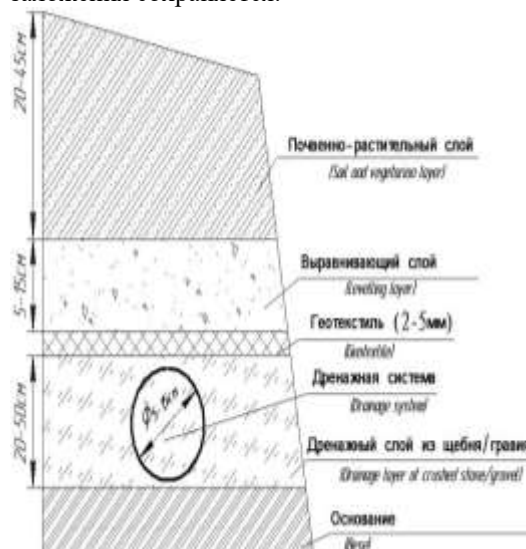


Рисунок 1. Обобщенная последовательность слоев при организации зеленых зон с отводом ливневых сточных вод

Figure1. The fundamental sequence of layers in the organization of sports grounds with stormwater drainage

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таким образом, эффективность дренажной системы определяется корректными расчетами гидравлических параметров с учетом фильтрационных свойств вмещающих слоев и специфики растительного покрова. Сточные воды, отводимые с искусственной зеленой зоны, представляют собой не просто излишки атмосферной влаги, а сложную многокомпонентную систему. Следовательно, при проектировании систем отвода и дальнейшей утилизации или очистки дренажных вод с зеленых зон необходимо учитывать не только их гидравлический объем, но и потенциальный химико-биологический состав, который может варьироваться в зависимости от стадии эксплуатации и региональных условий.

Классическим природо-инженерным решением для доочистки предварительно осветленных сточных вод на объектах локальной канализации являются поля подземной фильтрации, регламентируемые согласно СП 32.13330.2018. Механизм очистки в таких системах является многоступенчатым: после распределения через перфорацию водный поток проходит слой загрузки и естественный грунт. Эффективность и долговечность полей фильтрации зависят от соблюдения гидрогеологических ограничений и корректной нагрузки на систему; нарушение этих требований может привести к заиливанию и выводу системы из строя. В условиях плотной застройки и ужесточения экологических требований, основными недостатками полей фильтрации являются значительная занимаемая территория, сезонность и риск загрязнения грунтовых вод.

В отличие от полей фильтрации, спортивные газоны, организованные как многослойная дренирующая конструкция, обладают рядом преимуществ, поскольку они осуществляют доочистку ливневых сточных вод и выполняют рекреационную функцию. Вопрос, связанный с отведением ливневых стоков, на сегодняшний день,

является актуальным для городских агломераций, в которых применяется общесплавная система отвода, что с экологической и экономической точки зрения нецелесообразно. Встраивание спортивных газонов в систему обращения с ливневыми потоками с возможностью регулирования водного режима территории, который может быть использован для их же обслуживания, является перспективным экологическим решением. Технологические решения в области почвенной очистки сосредоточены на переходе от пассивной очистки к многофункциональным модулям интегрированных в экологический каркас территории. Высокая плотность размещения спортивных объектов в структуре урбанизированных территорий делает их основой для внедрения природоподобных технологий в области водоотведения и водоподготовки.

Дренажный сток со спортивной площадки по качественным характеристикам является специфическим, за счет природных и антропогенных факторов. В отличие от ливневого стока с городских территорий, характеризующегося комплексом химических загрязнений [29], сток со спортивных газонов отличается относительной стабильностью состава. Его основными загрязняющими компонентами являются взвешенные вещества минерального происхождения, которые вымываются из дренирующего слоя при интенсивном водном потоке. Качественная характеристика дренажного стока спортивного газона, расположенного на территории Санкт-Петербурга представлена в таблице 2.

Ключевой особенностью этого потока является минимальное содержание специфических антропогенных загрязнителей, что связано с отработанным регламентом по использованию и применению различных удобрений. Это кардинально отличает сток с сельскохозяйственных угодий и ряда других антропогенных объектов, в том числе городских газонов. При использовании обслуживающей техники возможно незначительное поступление нефтепродуктов, однако их содержание не является определяющим для качественной характеристики стока.

Таблица 2

Качественная характеристика дренажного стока со спортивного газона на территории г.Санкт-Петербурга и товарного почвогрунта

Table 2

Quality characteristics of drainage runoff from sports turf in St. Petersburg

Показатель Indicator	Ед. измерения Unit of measurement	Результат (спортивное поле) Result (sports field)	Неопр-ть Uncertainty (P=0,95)	Результат (вытяжка из товарного почвогрунта) Result (extraction from commercial soil)	Неопр-ть Uncertainty (P=0,95)
pH	Ед. pH	6,8	±0,02	6,2	±0,05
Взвешенные вещества suspended substances	мг/дм ³	64,15	±6,42	20,7	±4,2
БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	181,0	±17,0	206,3	±12,1
ХПК	мгО ₂ /дм ³	385	±54	458	±18,2
Азот общий common nitrogen	мг/дм ³	35,18	±5,28	40,5	±2
Фосфор общий total phosphorus	мг/дм ³	6,03	±1,81	8,3	±1,6

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculation

Важным показателем фильтрационного потока спортивной площадки является высокое содержание растворенного кислорода и слабощелочная среда (pH 6,8). Высокое содержание кислорода обусловлено хорошей аэрацией почвенного слоя и применением известковых материалов для регулирования кислотности плодородных слоев. Значение показателя БПК₅ свидетельствует о участии легкоокисляемой органики в почвенных процессах, с изменением содержания ее в почвенных водах. При этом основным источником органического вещества для этой системы являются гуминовые кислоты, продукты естественного разложения остатков травяного покрова и продукты деструкции используемого почвенного слоя.

Для оценки значимости различий между показателями качества дренажного стока (n = 14) и водной вытяжки из товарного почвогрунта (n = 3) использовали t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Установлено, что различия между группами по большинству показателей (pH, БПК₅, ХПК, азот общий, фосфор общий) статистически не значимы (p > 0,05). Исключение составили взвешенные вещества, для которых различия оказались значимыми (t = 4,12, df = 15, p < 0,05), что объясняется присутствием в натурном дренажном стоке минеральной мелкодисперсной

примеси, вымываемой из дренирующих слоев. Отсутствие значимых различий по органическим показателям свидетельствует об аналогии в закономерности формирования органической составляющей фильтрационных вод в исследованных системах.

Сравнение полученных значений с нормативами допустимого сброса в городскую канализацию (Постановление Правительства РФ № 644) показало, что дренажный сток соответствует требованиям по содержанию взвешенных веществ (64,15 мг/дм³ при норме до 100 мг/дм³) и pH (6,8 при диапазоне 6,5–8,5). Однако значения БПК₅ (181 мгО₂/дм³) и ХПК (385 мгО₂/дм³) превышают нормативы для сброса в централизованную систему водоотведения. Это обстоятельство является важным обоснованием для организации локальных систем очистки, обеспечивающих подготовку стока к сбросу в водных объект или системы канализации, либо доведение его до качества, которое будет соответствовать техническим условиям для использования в оборотных системах полива.

Лабораторная водная вытяжка имеет близкие характеристики к натуральному стоку, однако на начальной стадии в неустановившемся режиме наблюдаются повышенные значения БПК₅ и ХПК. Это объясняется высоким содержанием подвижной органической фазы почвенного

субстрата. Данный факт указывает на необходимость создания условий для перехвата органических веществ на разных этапах эксплуатации, предотвращая их поступление в водные системы. Удержание этих компонентов требует комплекса дополнительных физико-химических мероприятий, что не всегда предусмотрено условиями эксплуатации спортивного поля. Данное обстоятельство следует учитывать для вновь разрабатываемых объектов в системе управления качеством стока и включать дополнительные механизмы за счет биогеохимической сорбции, трансформации и разбавления воды в системе (почва-мембрана-дренаж). Качество конечного стока определяется эффективностью работы всей многослойной системы, что позволяет рассматривать спортивное поле управляемой моделью и аналогом для изучения миграции веществ в искусственных зеленых зонах.

Более сложным инженерным объектом, организованным по схожим принципам, является рекультивируемый полигон ТКО на завершающей биологической стадии. Его конструкция имеет технологическое подобие в последовательности операций по его заложению со спортивной площадкой. Технологическая аналогия заключается в использовании схожего принципа: создание многослойной системы с уклоном, где верхний растительный слой опирается на комплекс дренирующих, разделительных и защитных прослоек. Устройство дренажной системы на стадии биологической рекультивации полигона представляет собой сложную комплексную систему, направленную на обеспечение долгосрочной изоляции отходов и восстановление экологической функции территории, причем для этих целей могут быть использованы как природные материалы, так и материалы техносферного происхождения.

Отличие от спортивного поля заключается в целевой функции дренажной системы. Для спортивной площадки дренаж обеспечивает удаление влаги из полифункциональных слоев; этот процесс должен происходить достаточно быстро и не создавать проблем при эксплуатации верхнего слоя. Для рекультивируемого объекта наиболее значимой функцией является качественное предотвращение попадания влаги в тело полигона и недопущение смешения дренажных вод со специфическим фильтратом основной массы ТКО. В связи с этим скорость фильтрации может отличаться и быть существенно ниже, обеспечивая аэро-капиллярный режим почвенного слоя. Конструктивно это реализуется за счет создания определенных слоев, выполняющих дополнительную функцию.

Основу многослойной системы составляет противофильтрационный экран, который является ключевым элементом. Обычно он представлен

геомембраной из полиэтилена высокой плотности, образующей барьер от миграции загрязнений. Поверх этого экрана укладывается защитно-дренирующий слой, который защищает геомембрану от механических повреждений и отводит влагу, что и является фильтрационным потоком. Отвод воды осуществляется через сеть перфорированных дренажных труб в накопительный резервуар с последующей передачей на локальные очистные сооружения. Завершающим слоем служит почвенно-растительный покров, на котором высаживаются растения, характерные для данной климатической зоны, определяющие степень транспирации и стабильность структуры почвенного слоя.

Несмотря на обширную нормативную регламентацию проектирования и устройства дренажных систем для объектов рекультивации, качественная характеристика образующегося дренажного стока практически не представлена в открытых научных источниках и открытых официальных отчетах.

Как показали слушания на международном форуме «Экология большого города» 2026 года основной акцент по очистке сточных вод смещен на исследование фильтрата из тела полигона. Состав этих вод хорошо изучен и характеризуется сложным химическим составом и высокой вариабельностью токсичности [30,31]. Для управления качеством сточных вод с полигона целесообразно рассматривать отдельные механизмы образования: фильтрат из тела полигона, ливневые воды, дренажные воды и фильтрационные воды от стадии биологической рекультивации. Это позволит оценить общие и отдельные потоки для целей целевого применения механизмов регулирования качества, включая токсичность.

В связи с отсутствием систематических данных о дренажном стоке с рекультивируемого полигона, результаты исследования качества стока со спортивного поля могут быть использованы как референтные для отработки технологических решений по организации систем водоотведения и подготовки для повторного использования этих вод для обслуживания территорий. Общность конструктивных решений (почвенно-растительный слой — дренаж — основание) и установленное сходство закономерностей формирования фильтрационных вод (статистически незначимые различия по органическим и биогенным показателям между натурным стоком и водной вытяжкой из почвогрунта) позволяют предполагать, что спортивное поле можно рассматривать в качестве управляемой модели прогнозирования состава стока на рекультивируемых объектах.

Качественные характеристики дренажного стока со спортивного газона (табл. 2) могут быть

приняты как фоновые значения для подобных многослойных систем. Отклонения показателей дренажного стока с рекультивируемого полигона от этого условного фона будут количественной мерой влияния изолирующих слоев (их гранулометрического состава) и степени сохранности защитных барьеров. Таким образом, использование достаточно хорошо изученной системы в качестве аналитической модели, для развития понимания процессов, происходящих в исследуемых объектах, позволит оценить специфические особенности механизмов образования фильтрационного потока, а также механизмов формирования вмещающих органогенных слоев. Это является объектом дальнейшего исследования в лабораторных условиях по отработке природоподобных технологий с формированием новых органогенных слоев многофункционального назначения.

Заключение

Таким образом, в работе были рассмотрены региональные особенности создания различных типов искусственных зеленых зон, а также были систематизированы их конструктивные особенности. Установлено, что универсальной модели организации таких объектов не существует; технологические решения разрабатываются с учетом климатической зоны, типа естественных и искусственных грунтов, гидрогеологических условий и интенсивности антропогенной нагрузки, что непосредственно влияет на механизм формирования фильтрационного стока и его качественные характеристики.

Система вмещающих слоев определяет качественный состав воды, который зависит от совокупности процессов, происходящих внутри конструкции (ионный обмен, сорбция, фильтрация). Особое значение при разработке новых технологических решений имеет биохимическая трансформация органических веществ, процесс выщелачивания минеральных компонентов из дренирующих материалов, что накладывает дополнительные требования при исследовании

природоподобных технологий в экосистемах. Однако, экспериментальные исследования дренажного стока со спортивного газона в условиях Санкт-Петербурга показали, что при соблюдении регламентов эксплуатации и использования экологически безопасных материалов, позволяет формировать сточные воды достаточно стабильного состава. Содержание растворенного кислорода и минимальное количество специфических антропогенных загрязнителей можно регулировать в процессе эксплуатации. По качественным характеристикам этот поток можно отнести к слабозагрязненному, что позволяет реализовывать технологии илочистки по аналогии с природными поверхностными водами данного региона.

Исследования лабораторных систем почвогрунтов выявили корреляцию по интегральным показателям качества водных систем, из чего был сделан вывод об общности характера формирования фильтрационных вод. Для управления качеством образующихся потоков необходимы долговременные исследования и объём данных на разных стадиях жизненного цикла объекта. Внесение новых субстратов в почвенные слои может давать отклонения от ожидаемых концентраций основных компонентов в установившемся режиме фильтрации.

Установлена, технологическая аналогия в конструктивном устройстве спортивного поля и рекультивируемого полигона. Такое сравнение позволяет рассматривать спортивное поле в качестве аналитической модели, для прогнозирования миграционных процессов в более сложных природоподобных системах. Практическая значимость работы заключается в расширении представлений о реализации природоподобного проектирования на урбанизированных территориях. Полученные данные позволяют прогнозировать характеристики основного стока при проектировании и эксплуатации искусственных зеленых зон.

Список литературы

1. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России). Национальный проект «Экология». – URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/ (дата обращения: 06.10.2025).
2. Федеральный проект «Формирование комфортной городской среды» // Проектная дирекция Минстроя России. – URL: <https://pdminstroy.ru/federalniy-proekt-fkgs> (дата обращения: 07.10.2025).
3. Гагарина Е.С. Зеленая инфраструктура и экосистемные услуги в устойчивом развитии городов // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2023. – № 1(62). – С. 228–247. – DOI: 10.24412/1998-4839-2023-1-228-247.
4. Гайнулова Д.В. Подходы к проектированию локальных очистных сооружений в условиях плотной застройки // *Universum: технические науки*. – 2025. – Т. 4. – № 133. – С. 37–40. – DOI: 10.32743/UniTech.2025.133.4.19641.

5. Halecki W., Stachura T., Fudała W. Redefining urban spaces in stormwater assessment through ecosystem management: A narrative review. *Ambio*. 2025; 54(9): 1450-1472. DOI: 10.1007/s13280-025-02156-2.
6. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С., Мельник К.С. Оценка влияния урбанизации на годовой сток и качество вод в мире и на континентах // *Известия РАН. Серия географическая*. – 2022. – Т. 86. – № 3. – С. 470–480. – DOI: 10.31857/S2587556622030098.
7. Yadav S., Ambastha S., Pipil H. et al. Deciphering the Sustainable Stormwater Management Strategies for Urban Areas: a Review. *Water Resources Management*. 2025; 39: 2971-2991. DOI: 10.1007/s11269-025-04222-6.
8. Tota-Maharaj K., Rathnayake U., Karunanayake C., Cheddie D., Azamathulla H.M. Exploring granular filter media in sustainable drainage systems (SuDS) for stormwater pollutant adsorption: A pilot study. *Chemical Engineering Research and Design*. 2024; 210: 437-444. DOI: 10.1016/j.cherd.2024.08.035.
9. Веницианов Е.В., Аджиенко Г.В., Возняк А.А., Чиганова М.А. Современные проблемы оценки и прогноза качества поверхностных вод на урбанизированных территориях // *Водное хозяйство России*. – 2018. – № 1. – С. 47–59.
10. Потокина М.В., Стрекалова Т.А., Веретнова Т.А., Степанов А.Г., Будник Е.В. Анализ использования отходов IV—V класса опасности и осадков сточных вод при рекультивации нарушенных земель // *Проблемы региональной экологии*. – 2025. – № 1. – С. 73–77. – DOI: 10.24412/1728-323X-2025-1-73-77.
11. Юрк В.М., Шашкова А.А., Снегирев В.А., Третьякова Н.А. Оценка возможности использования гидролизного лигнина для биологической рекультивации // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2025. – Т. 33. – № 3. – С. 298–311. – DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-298-311.
12. Ковязин В.Ф., Пасько О.А., Борисова А.О., Нгуен Ч.А. Совершенствование метода инвентаризации земель рекреационных зон на примере парка Сосновка города Санкт-Петербург // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 169–178. – DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4935.
13. Essien A.E., Guo Y., Khafagy M. et al. Design and hydrologic performance estimation of highway filter drains using a novel analytical probabilistic model. *Scientific Reports*. 2024; 14: Art.6477. DOI: 10.1038/s41598-024-56781-0.
14. Лебедева М.А. Экологический каркас региона: количественный и качественный аспекты // *Вопросы территориального развития*. – 2024. – Т. 12. – № 2. – С. 1–13. – DOI: 10.15838/tdi.2024.2.66.3.
15. Zhang L., Yu H., Zhong Q., Zhang G., Wang Z., Zhang Q. Ecological flow-driven multifunctionality: A Nature-based Solutions framework for urban ecological corridor planning in high-density cities. *Ecological Indicators*. 2025; 179: Art.114224. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114224.
16. Спирин П.П. Эколого-ориентированное планирование в градостроительстве: значение и перспективы применения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2025. – Т. 10. – № 9. – С. 47–61. – DOI: 10.34031/2071-7318-2025-9-9-47-61.
17. Дрегуло А.М. Идентификация объектов накопленного вреда окружающей среде на основе первичных индикативных признаков деградации подземного пространства // *Географический вестник*. – 2024. – № 3 (70). – С. 125–138. – DOI: 10.17072/2079-7877-2024-3-125-138.
18. Hou D., Al-Tabbaa A., O'Connor D. et al. Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023; 4: 271-286. DOI: 10.1038/s43017-023-00404-1.
19. Лапушкин М.Ю. Рекультивация нарушенных земель как часть государственной экологической политики // *Международный технико-экономический журнал*. – 2020. – № 3. – С. 32–38. – DOI: 10.34286/1995-4646-2020-72-3-32-38.
20. Seidu S., Chan D.W.M., Taiwo R. Integrating green and grey infrastructure systems in dense urban regions: a synthesis of critical barriers and effective implementation guidelines. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2025; 27: 7555-7576. DOI: 10.1007/s10098-025-03309-3.
21. Егорова О.В., Нужина И.П., Каверзина Л.А., Никифорова В.А. Анализ и оценка уровня озеленения территории как фактора качества городской среды // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. – 2024. – № 2. – С. 301–309. – URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=3289> (дата обращения: 15.02.2026).
22. Zhang J., Zhang P., Liu Y. et al. A strategy for green infrastructure network based on multifunctional synergy. *Ecological Frontiers*. 2025; 45(2): 483-496. DOI: 10.1016/j.ecofro.2024.11.013.
23. Дубино А.М. Зарубежный опыт включения водно-зеленого каркаса в градостроительную документацию // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2025. – № 3(72). – С. 275–292. – DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-275-292.
24. Batista G.S., Rocha E.G., Lacerda M.C., Barros Filho M.N.M., Calheiros C.S.C. Applications of floating treatment wetlands for remediation of rainwater and polluted waters: a systematic review and bibliometric analysis. *Wetlands Ecology and Management*. 2025; 33: Art.27, pp.26-49. DOI: 10.1007/s11273-025-10042-7.

25. Enzi V., Manso M., Aires A., Almalla R., Catalano C., et al. Implementing green roofs and walls: lessons from European experiences / Vierikko K., Orta-Ortiz M.S., Nieminen H., Vasilakopoulos P., Velasco Gomez D.M. (editors). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2026. 114 p. DOI: 10.2760/8059292.
26. Гвоздева О.В., Рассказова А.А., Цуриков И.М., Чуксин И.В. Информационное обеспечение паспортизации объектов городского хозяйства на территории г. Москвы // Московский экономический журнал. – 2025. – № 4. – С. 66–92. – DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_4_95.
27. Тесленок С.А., Фролов А.С. Особенности создания карты зеленых насаждений города Ханты-Мансийска в среде GIS NextGIS // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 4. – С. 120–137. – DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-120-137.
28. Гашкина Н.А., Моисеенко Т.И., Дину М.И., Таций Ю.Г., Баранов Д.Ю. Биогеохимическая миграция элементов в системе атмосферные осадки – кроновые воды – почвенные воды – озеро в фоновом регионе (Валдайский национальный парк) // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 7. – С. 693–710. – DOI: 10.31857/S0016752520050027.
29. Сабылина А.В., Ефремова Т.А., Икко О.И. Химический состав поверхностных сточных и речных вод, поступающих с территории города Петрозаводска в Онежское озеро // Известия Русского географического общества. – 2022. – Т. 154. – № 4. – С. 39–53. – DOI: 10.31857/S0869607122040073.
30. Минашкина А.В., Кондратенко С.В. Изменчивость химических показателей фильтрационных вод полигона твердых коммунальных отходов в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 64. – С. 558–574. – DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-558-574.
31. Awino F.B., Garland G. Occurrence of emerging and persistent organic pollutants in dumpsite environments: A review. *Environmental Challenges*. 2025; 18: Art.101094. DOI: 10.1016/j.envc.2025.101094.

References

1. Ministerstvo prirodnikh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii (Minprirody Rossii). Natsional'nyy projekt «Ekologiya». [National Project «Ecology»]. (In Russ.). URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/ (accessed: 06.10.2025).
2. Federal'nyy projekt «Formirovanie komfortnoy gorodskoy sredy». [Federal Project «Formation of a comfortable urban environment»]. Proektnaya direktsiya Ministroya Rossii. (In Russ.). URL: <https://pdminstroy.ru/federalniy-proekt-fkgs> (accessed: 07.10.2025).
3. Gagarina E.S. Zelenaya infrastruktura i ekosistemnye uslugi v ustoychivom razvitii gorodov. [Green infrastructure and ecosystem services in sustainable urban development]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023;(1(62)):228-247. (In Russ.). DOI: 10.24412/1998-4839-2023-1-228-247.
4. Gaynulova D.V. Podkhody k proektirovaniyu lokal'nykh ochistnykh sooruzheniy v usloviyakh plotnoy zastroyki. [Approaches to the design of local treatment facilities in dense urban areas]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: technical sciences*. 2025;4(133):37-40. (In Russ.). DOI: 10.32743/UniTech.2025.133.4.19641.
5. Halecki W., Stachura T., Fudała W. Redefining urban spaces in stormwater assessment through ecosystem management: A narrative review. *Ambio*. 2025;54(9):1450-1472. DOI: 10.1007/s13280-025-02156-2.
6. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaytseva I.S., Mel'nik K.S. Otsenka vliyaniya urbanizatsii na godovoy stok i kachestvo vod v mire i na kontinentakh. [Assessment of the impact of urbanization on annual runoff and water quality in the world and on continents]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2022;86(3):470-480. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2587556622030098.
7. Yadav S., Ambastha S., Pipil H. et al. Deciphering the Sustainable Stormwater Management Strategies for Urban Areas: a Review. *Water Resources Management*. 2025;39:2971-2991. DOI: 10.1007/s11269-025-04222-6.
8. Tota-Maharaj K., Rathnayake U., Karunanayake C., Cheddie D., Azamathulla H.M. Exploring granular filter media in sustainable drainage systems (SuDS) for stormwater pollutant adsorption: A pilot study. *Chemical Engineering Research and Design*. 2024;210:437-444. DOI: 10.1016/j.cherd.2024.08.035.
9. Venitsianov E.V., Adzhienko G.V., Voznyak A.A., Chiganova M.A. Sovremennye problemy otsenki i prognoza kachestva poverkhnostnykh vod na urbanizirovannykh territoriyakh. [Modern problems of assessment and forecast of surface water quality in urbanized areas]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii = Water Sector of Russia*. 2018;(1):47-59.
10. Potokina M.V., Strekalova T.A., Veretnova T.A., Stepanov A.G., Budnik E.V. Analiz ispol'zovaniya otkhodov IV—V klassa opasnosti i osadkov stochnykh vod pri rekul'tivatsii narushennykh zemel'. [Analysis of the use of hazard class IV—V waste and sewage sludge in the remediation of disturbed lands]. *Problemy regional'noy ekologii = Problems of Regional Ecology*. 2025;(1):73-77. (In Russ.). DOI: 10.24412/1728-323X-2025-1-73-77.
11. Yurk V.M., Shashkova A.A., Snegirev V.A., Tret'yakova N.A. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya gidroliznogo lignina dlya biologicheskoy rekul'tivatsii. [Assessment of the possibility of using hydrolytic lignin for biological remediation]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost'*

- zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety.* 2025;33(3):298-311. (In Russ.). DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-298-311.
12. Kovyazin V.F., Pas'ko O.A., Borisova A.O., Nguen Ch.A. Sovershenstvovanie metoda inventarizatsii zemel' rekreatsionnykh zon na primere parka Sosnovka goroda Sankt-Peterburg. [Improvement of the method of inventory of recreational land on the example of Sosnovka Park in St. Petersburg]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geoengineering.* 2025;336(4):169-178. (In Russ.). DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4935.
 13. Essien A.E., Guo Y., Khafagy M. et al. Design and hydrologic performance estimation of highway filter drains using a novel analytical probabilistic model. *Scientific Reports.* 2024;14: Art.6477. DOI: 10.1038/s41598-024-56781-0.
 14. Lebedeva M.A. Ekologicheskii karkas regiona: kolichestvennyy i kachestvennyy aspekty. [Ecological framework of the region: quantitative and qualitative aspects]. *Voprosy territorial'nogo razvitiya = Issues of Territorial Development.* 2024;12(2):1-13. (In Russ.). DOI: 10.15838/tdi.2024.2.66.3.
 15. Zhang L., Yu H., Zhong Q., Zhang G., Wang Z., Zhang Q. Ecological flow-driven multifunctionality: A Nature-based Solutions framework for urban ecological corridor planning in high-density cities. *Ecological Indicators.* 2025;179: Art.114224. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114224.
 16. Spirin P.P. Ekologo-orientirovannoe planirovanie v gradostroitel'stve: znachenie i perspektivy primeneniya. [Ecologically-oriented planning in urban planning: significance and application prospects]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2025;10(9):47-61. (In Russ.). DOI: 10.34031/2071-7318-2025-9-9-47-61.
 17. Dregulo A.M. Identifikatsiya ob'ektov nakoplennoogo vreda okruzhayushchey srede na osnove pervichnykh indikativnykh priznakov degradatsii podzemnogo prostranstva. [Identification of objects of accumulated environmental damage based on primary indicative signs of underground space degradation]. *Geograficheskii vestnik = Geographical Bulletin.* 2024;(3(70)):125-138. (In Russ.). DOI: 10.17072/2079-7877-2024-3-125-138.
 18. Hou D., Al-Tabbaa A., O'Connor D. et al. Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. *Nature Reviews Earth & Environment.* 2023;4:271-286. DOI: 10.1038/s43017-023-00404-1.
 19. Lapushkin M.Yu. Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' kak chast' gosudarstvennoy ekologicheskoy politiki. [Remediation of disturbed lands as part of the state environmental policy]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskii zhurnal = International Technical and Economic Journal.* 2020;(3):32-38. (In Russ.). DOI: 10.34286/1995-4646-2020-72-3-32-38.
 20. Seidu S., Chan D.W.M., Taiwo R. Integrating green and grey infrastructure systems in dense urban regions: a synthesis of critical barriers and effective implementation guidelines. *Clean Technologies and Environmental Policy.* 2025;27:7555-7576. DOI: 10.1007/s10098-025-03309-3.
 21. Egorova O.V., Nuzhina I.P., Kaverzina L.A., Nikiforova V.A. Analiz i otsenka urovnya ozeleneniya territorii kak faktora kachestva gorodskoy srede. [Analysis and assessment of the level of landscaping as a factor of urban environment quality]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava = Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law.* 2024;(2):301-309. (In Russ.). URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=3289> (accessed: 15.02.2026).
 22. Zhang J., Zhang P., Liu Y. et al. A strategy for green infrastructure network based on multifunctional synergy. *Ecological Frontiers.* 2025;45(2):483-496. DOI: 10.1016/j.ecofro.2024.11.013.
 23. Dubino A.M. Zarubezhnyy opyt vkluycheniya vodno-zelenogo karkasa v gradostroitel'nyuyu dokumentatsiyu. [Foreign experience of incorporating the water-green framework into urban planning documentation]. *Architecture and Modern Information Technologies.* 2025;(3(72)):275-292. (In Russ.). DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-275-292.
 24. Batista G.S., Rocha E.G., Lacerda M.C., Barros Filho M.N.M., Calheiros C.S.C. Applications of floating treatment wetlands for remediation of rainwater and polluted waters: a systematic review and bibliometric analysis. *Wetlands Ecology and Management.* 2025;33: Art.27, pp.26-49. DOI: 10.1007/s11273-025-10042-7.
 25. Enzi V., Manso M., Aires A., Almalla R., Catalano C., et al. Implementing green roofs and walls: lessons from European experiences. Vierikko K., Orta-Ortiz M.S., Nieminen H., Vasilakopoulos P., Velasco Gomez D.M. (eds.). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2026. 114 p. DOI: 10.2760/8059292.
 26. Gvozdeva O.V., Rasskazova A.A., Tsurikov I.M., Chuksin I.V. Informatsionnoe obespechenie pasportizatsii ob'ektov gorodskogo khozyaystva na territorii g. Moskvy. [Information support for certification of urban economy objects in Moscow]. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal = Moscow Economic Journal.* 2025;(4):66-92. (In Russ.). DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_4_95.
 27. Teslenok S.A., Frolov A.S. Osobennosti sozdaniya karty zelenykh nasazhdeniy goroda Khanty-Mansiyska v srede GIS NextGIS. [Features of creating a map of green spaces in Khanty-Mansiysk in the GIS NextGIS environment]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya «Nauki o Zemle» = Bulletin of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Series «Earth Sciences».* 2024;(4):120-137. (In Russ.). DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-120-137.

28. Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Dinu M.I., Tatsiy Yu.G., Baranov D.Yu. Biogekhimicheskaya migratsiya elementov v sisteme atmosferynye osadki – kronovye vody – pochvennye vody – ozero v fonovom regione (Valdayskiy natsional'nyy park). [Biogeochemical migration of elements in the system atmospheric precipitation – throughfall – soil water – lake in a background region (Valdai National Park)]. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2020;65(7):693-710. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0016752520050027.
29. Sabylina A.V., Efremova T.A., Ikko O.I. Khimicheskiy sostav poverkhnostnykh stochnykh i rechnykh vod, postupayushchikh s territorii goroda Petrozavodsk v Onezhskoe ozero. [Chemical composition of surface wastewater and river water entering Lake Onega from the territory of Petrozavodsk]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2022;154(4):39-53. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869607122040073.
30. Minashkina A.V., Kondratenko S.V. Izmenchivost' khimicheskikh pokazateley fil'tratsionnykh vod poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov v pos. im. A. Kosmodemyanskogo Kaliningradskoy oblasti. [Variability of chemical parameters of filtration water of a solid municipal waste landfill in the settlement named after A. Kosmodemyansky, Kaliningrad region]. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(64):558-574. (In Russ.). DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-558-574.
31. Awino F.B., Garland G. Occurrence of emerging and persistent organic pollutants in dumpsite environments: A review. *Environmental Challenges*. 2025;18: Art.101094. DOI: 10.1016/j.envc.2025.101094.

Сведения об авторах

✉ Мазурик Дарья Игоревна – аспирант кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3550-6062>, e-mail: mazurikdi@mail.ru.

Дягилева Алла Борисовна – доктор химических наук, профессор кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5983-4550>, e-mail: abdiag@mail.ru.

Information about the authors

✉ Daria I. Mazurik – Postgraduate student at the Department of Cellulose Technology and Composite Materials, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3550-6062>, e-mail: mazurikdi@mail.ru.

Alla B. Dyagileva – Doctor of Chemical Sciences, Professor at the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5983-4550>, e-mail: abdiag@mail.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author



Совершенствование механизма рекультивации нарушенных в результате геологического изучения недр и добычи россыпного золота лесных земель

Руслан А. Шарафутдинов¹, rsharafutdinov@sfu-kras.ru <https://orcid.org/0000-0002-0282-9133>

Антон И. Пыжев¹, apyzhev@sfu-kras.ru <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>

Роман В. Гордеев¹ rgordeev@sfu-kras.ru <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>

Александр Р. Митев¹, a.r.mitev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-4525-4867>

¹*Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация*

Основным способом минимизации ущерба, наносимого лесным экосистемам в результате геологического изучения недр и добычи россыпного золота, является рекультивация. Однако неэффективность сложившегося в России механизма контроля за проведением рекультивационных работ порождает неуправляемые экологические риски как непосредственно в местах осуществления хозяйственной деятельности, так и для близлежащих поселений. Наблюдается существенный разрыв между формальным юридическим соблюдением норм и реальным экологическим результатом. Проблема проявляется особенно остро в регионах Сибири и Дальнего Востока, на территории которых сосредоточена основная часть текущей и перспективной базы золотодобычи всей страны. В настоящей работе проведен анализ практики нормативного регулирования и приемки работ по рекультивации лесных земель на примере Красноярского края. Показано, что существенными препятствиями для объективной оценки качества проведенных работ могут являться недостаток компетенций у представителей комиссии по приемке, отсутствие необходимой приборной базы, а также различные виды конфликта интересов. Сформированы предложения по совершенствованию процедуры приемки рекультивационных работ и последующему экологическому мониторингу рекультивированных лесных участков, которые могут способствовать балансированию интересов недропользователей, государства и населения.

Ключевые слова: *лесные экосистемы, рекультивация лесных земель, добыча россыпного золота, экологические экстерналии, внешние эффекты, Красноярский край, Сибирь и Дальний Восток*

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-18-20080, <https://rscf.ru/project/25-18-20080/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Совершенствование механизма рекультивации нарушенных в результате геологического изучения недр и добычи россыпного золота лесных земель / Р. А. Шарафутдинов, А. И. Пыжев, Р. В. Гордеев, А. Р. Митев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 294–311. – *Библиогр.*: с. 307–310 (29 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/19>.

Поступила 24.03.2026. Пересмотрена 02.05.2026. Принята 15.05.2026. Опубликовано онлайн 26.06.2026

Refining the reclamation process for forest lands damaged by geological exploration and mining of placer gold

Ruslan A. Sharafutdinov¹, rsharafutdinov@sfu-kras.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0282-9133>

Anton I. Pyzhev¹, apyzhev@sfu-kras.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>

Roman V. Gordeev¹ , rgordeev@sfu-kras.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>

Aleksandr R. Mitev¹, a.r.mitev@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-4525-4867>

¹ *Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation*

Abstract

The main way to minimize the damage caused to forest ecosystems by geological exploration and gold mining is forest reclamation. However, ineffective regulation of the reclamation process and lack of quality control led to environmental risks in areas of economic activity and nearby settlements, causing a significant gap between compliance with legislation and actual environmental results. The problem is particularly acute in the regions of Siberia and the Far East, which contain a significant share of Russia's current and future gold mining potential. This paper analyzes the current practices of forest land reclamation in the Krasnoyarsk Krai. We found that the lack of expertise among members of the quality assessment committee, lack of necessary equipment, and conflicts of interest can pose significant obstacles to a fair assessment of the quality of reforestation projects. Based on these findings, we have developed proposals to improve the process of evaluating the quality of forest reclamation and subsequent monitoring of the environment in restored forest areas. These proposals aim to achieve a balance between the interests of business, government and the public by providing a more objective assessment of the outcomes of reclaiming forest lands.

Keywords: *forest ecosystems, forest reclamation, gold mining, negative externalities, environmental damage, Krasnoyarsk Krai, Siberia and the Far East*

Funding: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation, project no. 25-18-20080, <https://rscf.ru/en/project/25-18-20080/>, grant of the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

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

For citation: Sharafutdinov R. A., Pyzhev A. I., Gordeev R. V., Mitev A. R. (2026) Refining the reclamation process for forest lands damaged by geological exploration and mining of placer gold. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 294–311 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/19>.

Received 24.03.2026.

Revised 02.05.2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Российская Федерация занимает второе место по объемам добычи золота в мире, причем 15 % этого объема приходится на россыпные месторождения⁷. Уже к 2030 г. на территории Сибири планируется нарастить объемы добычи золота до 106 т — более чем в два раза от текущего уровня⁸. Геологическое изучение недр, разведка и добыча россыпного золота сопровождаются значимым негативным воздействием на окружающую среду. Среди последствий такой хозяйственной деятельности: загрязнение атмосферного воздуха отходами освоения

месторождений, превышение допустимых концентраций загрязняющих веществ в воде, эрозия почв, отчуждение земель из лесного фонда, причинение вреда редким видам растений [1]. Население близлежащих территорий подвергается повышенным канцерогенным и неканцерогенным рискам [2], накоплению металлов в организме [1], что приводит к росту уровня заболеваемости [3]. Эти проблемы характерны для многих государств, в которых распространена мелкомасштабная добыча золота, в том числе для Китая [4], Австралии [5; 6], стран Африки [7; 8] и Латинской Америки [9; 10].

В России негативные эффекты от недобросовестного проведения работ по

⁷ Кислицына А. Союз старателей России. О добыче россыпного золота из месторождений // Деловой журнал недропользователя «Глобус». 15.12.2025. URL: <https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/soyuz-staratelej-rossii-o-dobyche-zolota-iz-rossypanyh-mestorozhdenij-29760/> (дата обращения: 22.03.2026).

⁸ План реализации Стратегии социально-экономического развития Сибирского федерального округа до 2035 года. Утвержден Распоряжением Правительства РФ от 16.10.2023 г. № 2846-р.

золотодобыче особенно заметны в регионах Сибири и Дальнего Востока. Так, разработка россыпей в Тугуро-Чумиканском районе Хабаровского края привела к масштабному загрязнению поверхностных водотоков и уничтожению значительной части наиболее продуктивных лесных участков [11]. Многолетнее интенсивное освоение россыпных месторождений вблизи п. Бриакан Хабаровского края вызвало стократное превышение предельно допустимых концентраций (далее — ПДК) соединений мышьяка и свинца в атмосферном воздухе, превышение ПДК цинка, ртути, марганца и меди в водных объектах рыбохозяйственного значения, превышение допустимых концентраций свинца, мышьяка и ртути в снежном покрове, содержания соединений тяжелых металлов в грунтовых водах и колодезной воде [1]. Как следствие, в п. Бриакан фиксируется в 1,5—2 раза больше заболеваний органов дыхания, нервной системы, пищеварения, кровообращения, онкологических заболеваний по сравнению со свободной от загрязнения территорией проживания [Там же]. В результате золотодобычи в Восточном Забайкалье в бассейнах рек Шилка и Аргунь наблюдается повышенное содержание взвешенных веществ, железа, сульфатного иона, хрома, меди, кобальта, никеля, а также затруднено восстановление растительности на склонах отвалов [12]. Разработка Саралинского золоторудного месторождения в Республике Хакасия привела к росту концентрации металлов в почве на территории хвостохранилища и в районе п. Приисковый, что увеличивает риски развития онкологических и иных заболеваний в результате контактов населения с почвой [3].

Из приведенных выше примеров следует, что экологический ущерб значителен и длится в том числе и после окончания работ по золотодобыче. Оценка масштабов такого ущерба сложна. Редким примером экономической оценки нанесенного экологического ущерба является работа [13], в которой на примере р. Воскресенка Кемеровской области ежегодный ущерб от загрязнения реки был оценен в 912 тыс. долл. США, а ущерб от загрязнения грунтовых вод в 597 тыс. долл. США. Комплексная оценка экологического ущерба затрудняется и тем, что негативное воздействие не

ограничено лишь участком россыпной золотодобычи, поскольку взвеси загрязняющих веществ могут распространяться далее по водотокам [12]. Таким образом негативное воздействие испытывает не только население близлежащих поселков, но и жители достаточно отдаленных от места добычи поселений.

Усугубляет потенциальные риски для здоровья населения тот факт, что согласно п. 8 ч. 15 ст. 65 Водного кодекса РФ⁹ разведка и добыча полезных ископаемых в некоторых случаях может производиться в том числе в пределах водоохранных зон¹⁰. Подобная деятельность приводит к полному уничтожению лесных экосистем в водоохранных зонах рек, выполняющих важнейшие функции по защите почвенного покрова от эрозии и поверхностных вод от загрязнения.

Ярким примером негативных последствий добычи полезных ископаемых в водоохранных лесах служит остановка водозабора «Гремячий лог» для предотвращения подачи некачественной воды жителям Красноярска 2 сентября 2025 г.¹¹ В результате резкого повышения мутности правого крупного притока р. Маны после интенсивных ливней качество воды в р. Енисей, служащей источником воды для населения г. Красноярска, существенно снизилось. Столь высокий уровень мутности в Енисее в черте городских водозаборов зафиксирован впервые за всю историю наблюдений, осуществляемых с 1911 г. Причина неординарного события, поставившего под угрозу стратегическую безопасность одного из крупнейших российских городов, заключается в том, что в пределах водосборного бассейна р. Маны, в результате деятельности по добыче россыпного золота более 1,5 тыс. га водоохранных лесов превращены в техногенные ландшафты с отстойниками, дамбами и карьерами¹². Результатом деятельности недропользователей стало развитие масштабной эрозии незакрепленных рыхлых пород после ливневых осадков с их последующим выносом в р. Енисей.

Возможность восстановления функций лесных экосистем на участках, нарушенных в результате золотодобычи, зависит от того, насколько качественно была проведена их рекультивация [14]. К примеру, в работе [15] на

⁹ Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 г. № 74-ФЗ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/23878> (дата обращения: 22.03.2026).

¹⁰ Пункт 8 ч. 15 ст. 65 Водного кодекса РФ введен Федеральным законом от 21.10.2013 № 282-ФЗ.

¹¹ Д. Машуков. Из-за внезапно помутневшего Енисея в Красноярске отключат воду // Российская газета. 02.09.2025. URL: [https://rg.ru/2025/09/02/reg-](https://rg.ru/2025/09/02/reg-sibfo/iz-za-vnezapno-pomutnevshego-eniseia-v-krasnoarske-otkliuchat-vodu.html)

[sibfo/iz-za-vnezapno-pomutnevshego-eniseia-v-krasnoarske-otkliuchat-vodu.html](https://rg.ru/2025/09/02/reg-sibfo/iz-za-vnezapno-pomutnevshego-eniseia-v-krasnoarske-otkliuchat-vodu.html) (дата обращения: 02.02.2026).

¹² В верховьях непосредственно р. Маны такому воздействию подверглись 460 га. Значительные участки оказались нарушены и в притоках р. Маны, таких как р. Мина (520 га), р. Большая Жайма (216 га), р. Кувай (390 га).

основе обследования 27 участков лесных культур, созданных на месте полигонов добычи россыпного золота на Урале, показано, что достижение высоких показателей приживаемости может быть обеспечено лишь за счет семян местного происхождения или районированных семян I класса качества. А при посеве семян сосны II класса доля списанных лесных культур составляла 74,8 %. Проблема оценки качества рекультивации заключается в сложности оценки соответствия фактического результата проектным целям, а также в трудности организации контроля и надзора за ходом работ. Однако несмотря на активизацию законодательства по теме рекультивации земель в последние годы, вопросам оценки качества проведения таких работ пока уделяется недостаточно внимания. Настоящее исследование преследует цель на основе анализа недостатков действующей законодательной базы разработать предложения, способствующие повышению контроля за качеством рекультивационных работ на лесных землях.

Материалы и методы

Объектом исследования является действующая в России нормативно-правовая база в отношении рекультивации земель, нарушенных в ходе геологического изучения недр, разведки месторождений и золотодобычи, которая регламентирует следующие вопросы:

1. Особенности проведения геологических работ на землях различного назначения: Лесной кодекс РФ, Водный кодекс РФ, Земельный кодекс РФ, ФЗ «Об охране окружающей среды», Правила проведения рекультивации и консервации земель, утвержденные в 2025 г., а также их предыдущая версия, утвержденная в 2018 г.

2. Ответственность недропользователя в случае нарушения обязанностей по рекультивации земель: Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях (ст. 8.6, ст. 8.7, ст. 19.5, ст. 28.3).

3. Правоотношения арендодателя и арендатора участка земли, предназначенного для недропользования: Гражданский кодекс Российской Федерации (ст. 622), практика решений Арбитражного суда Красноярского края.

4. Государственные стандарты в области земляных работ и рекультивации земель, в том числе используемые при составлении проектов рекультивации: ГОСТ 17.5.1.02-85, ГОСТ 17.5.1.02-

85, ГОСТ 17.5.3.06-85, ГОСТ Р 72033-2025, ГОСТ 17.5.1.03-86.

Предметом исследования выступают сложившиеся институты приемки работ по рекультивации нарушенных земель и оценки их качества. Следует отметить методологическую сложность оценки качества проведенной рекультивации. Согласно действующим нормативным документам, качественная рекультивация земель должна обеспечить восстановление нарушенных участков до состояния, пригодного для целевого использования (сельское хозяйство, лесоводство, рекреация), соответствовать экологическим, санитарно-эпидемиологическим нормативам и нормам¹³. Вместе с тем, если проект рекультивации прошел экспертизу и был утвержден, то единственным корректным с позиции законодательства критерием оценки качества рекультивации является проверка полноты соответствия выполненных работ заявленному проекту, вне зависимости от уместности применяемых решений.

При подготовке статьи авторы использовали личный опыт, полученный в рамках работы в качестве экспертов, привлекавшихся правоохранительными органами Российской Федерации, а также Министерством экологии Красноярского края. Авторы принимали личное участие, в том числе, в выездных следственных мероприятиях на лесных участках, используемых на основании договора аренды в целях осуществления геологического изучения недр, разведки и добычи полезных ископаемых (золота) в различных районах Красноярского края. Исследование проиллюстрировано примерами нарушенных лесных земель в Красноярском крае, однако его ключевые выводы могут быть распространены как на другие категории земель, так и на другие регионы Российской Федерации.

Результаты

Согласно открытым данным Росприроднадзора площадь рекультивированных участков существенно отстает от площади земель, нарушенных в ходе разработки полезных ископаемых¹⁴. Наиболее частым направлением рекультивации является именно лесохозяйственное: в среднем по России за 2020–2025 гг. на него приходилось 50–70 % всей площади

¹³ Правила проведения рекультивации и консервации земель, утвержденные постановлением Правительства РФ от 29.05.2025 № 781, ГОСТ Р 57446-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия».

¹⁴ Росприроднадзор. Отчет по форме федерального статистического наблюдения № 2-ТП (рекультивация). URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/land-recultivation/> (дата обращения: 09.05.2026).

рекультивированных земель, а в Красноярском крае это значение достигало 80–95 %.

Несмотря на непростые условия для добывающей промышленности, кризисные явления последних лет в большей степени отрицательно повлияли именно на динамику объемов рекультивационных работ (Рисунок 1). Суммирование накопленным итогом ежегодной статистики за 2020–2025 гг. позволяет сделать вывод о том, что в России в среднем рекультивируется лишь 45 % из общей площади нарушенных при разработке полезных ископаемых земель¹⁵. Стоит отметить, что в отдельных регионах, таких как Камчатский край или Тюменская область,

площадь рекультивированных участков оказалась даже выше площади нарушенных земель за указанный период. Однако в большинстве регионов Урала, Сибири и Дальнего Востока с наиболее интенсивной добычей ресурсов эта доля невелика и в ХМАО составляет 55 %, в Якутии — 49 %, в Магаданской области — 35 %, в Иркутской области — 33 %, а в Красноярском крае — 40 %. Кроме того, накопленная сумма площадей, нарушенных в течение 2020–2025 гг., составляет менее половины территории РФ, которая числится нарушенной при разработке полезных ископаемых на конец 2025 г. (1,28 млн га). Таким образом, реальная доля рекультивированных земель может быть еще ниже.

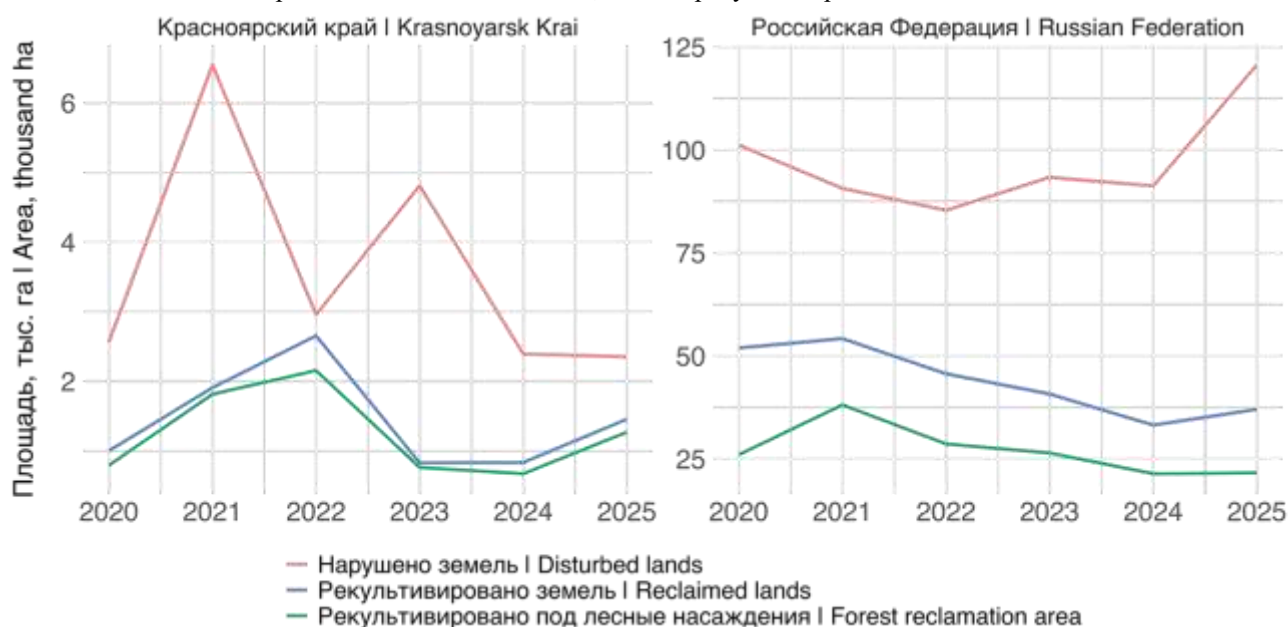


Рисунок 1. Динамика площади нарушенных и рекультивированных земель в ходе разработки полезных ископаемых в 2020–2025 гг., тыс. га

Figure 1. Dynamics of disturbed and reclaimed land areas resulting from mineral resource extraction in 2020–2025, thousand hectares.

Источник: Росприроднадзор

Source: Federal Service for Supervision of Natural Resources (Rosprirodnadzor)

Существенным минусом имеющихся открытых данных Росприроднадзора является отсутствие детализации по видам деятельности, что делает невозможным получение точных оценок площади нарушенных и рекультивированных земель в результате добычи золота. По данным Союза старателей России за 2021 г. золотодобычей нарушено менее 0,1 млн га.¹⁶ Сопоставление с

укрупненными данными Росприроднадзора позволяет сделать вывод, что эта площадь составляет до 9 % всех нарушенных при разработке полезных ископаемых земель. Несмотря на достаточно скромные объемы, масштаб влияния россыпной золотодобычи на водные экосистемы может быть значительным. По данным спутникового мониторинга регионов Сибири в 2020

¹⁵ Такая оценка предполагает некоторое упрощение, поскольку рекультивированные за отчетный период земли вероятно были нарушены еще в прошлых периодах.

¹⁶ Чем дальше в лес — тем меньше толку // Бизнес-газета «Наш регион — Дальний Восток». № 06

(166). 31.05.2021. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_industry?obj=32157dc993ed0cd15aa8f9b98dae9d3e (дата обращения: 09.05.2026).

г. было выявлено 78 фактов загрязнения водных объектов, причастных к добыче россыпного золота, с общей протяженностью загрязнений водных объектов 2611 км¹⁷.

С точки зрения экономической теории сложившаяся ситуация является проявлением отрицательных экстерналий [16]: недостаточно эффективное регулирование позволяет золотодобытчикам перекладывать экологические издержки на государство и население, проживающее вблизи мест проведения геологических работ. Происходит столкновение интересов трех сторон:

1) золотодобывающие компании стремятся вести свою хозяйственную деятельность с минимальными издержками на рекультивацию территорий;

2) население¹⁸ заинтересовано в уменьшении ущерба здоровью и сохранности рекреационных функций территории на уровне не ниже, чем было до золотодобычи;

3) государство заинтересовано в получении своей части доходов от золотодобычи, соблюдении законодательства и отсутствии негативных последствий, которые бы потребовали расходов на восстановление и содержание территории в будущем (экологический ущерб, вред здоровью населения, некачественная рекультивация).

При этом существующие институциональные рамки удовлетворяют интересам добывающих компаний и частично — государственным, связанным с получением рентных доходов. Интересы населения часто оказываются ущемлены ввиду недобросовестного проведения рекультивации недропользователями, слабого

контроля со стороны профильных регуляторов и общественных институтов.

В последние годы государство начало активнее обращать внимание на грубые нарушения технологий, допущенные золотодобывающими компаниями при разработке месторождений, и сопутствующие экологические последствия^{19,20}. Наблюдается активизация и законодательского процесса: в 2025 г. приняты новые Правила проведения рекультивации и консервации земель²¹ (далее — Правила рекультивации). Осенью 2025 г. в Государственную Думу внесен законопроект, предполагающий выдачу лицензий на пользование недрами лишь в случае предоставления недропользователем финансового обеспечения по рекультивации земель в виде специального рекультивационного фонда²² либо безотзывной банковской гарантии²³. В пояснительной записке к законопроекту указано, что особенно остро проблема неисполнения обязательств по рекультивации земель проявляется «при разработке месторождений рудного и россыпного золота, а также общераспространенных полезных ископаемых»²⁴.

Несмотря на полезность предлагаемых изменений, стоит отметить, что законопроект направлен на противодействие невыполнению рекультивационных работ, но не способствует обеспечению их соответствия нормативным требованиям. Проблема оценки качества проведения рекультивационных работ возникает в момент возврата недропользователем арендованного участка земли. Согласно п. 5 Правил рекультивации результат должен соответствовать либо «установленным нормативам качества

¹⁷ Золотодобытчики загрязнили более 2,5 тыс. км рек в Сибири // Интерфакс. 19.10.2020. URL: <https://www.interfax.ru/russia/732105> (дата обращения: 09.05.2026).

¹⁸ Интересы населения могут быть и противоречивы, поскольку золотодобыча обеспечивает близлежащие поселки высокодоходными рабочими местами. В контексте обсуждения имеется в виду часть населения, не задействованная в процессах золотодобычи и не получающая от нее прямых выгод.

¹⁹ Росприроднадзор в 2024 году нашел у золотодобытчиков 1,5 тыс. нарушений // ТАСС. 06.06.2025. URL: <https://tass.ru/ekonomika/24153259> (дата обращения: 21.03.2026).

²⁰ Нарушения технологии золотодобычи в Алтайском крае и других регионах страны обсудили в Госдуме // Официальный сайт Алтайского краевого законодательного собрания. 19.06.2025. URL: <https://www.akzs.ru/news/1118/104573> (дата обращения: 21.03.2026).

²¹ Утверждены постановлением Правительства РФ от 29 мая 2025 г. № 781.

²² Любопытно, что в академической литературе подобные предложения на основе анализа зарубежного опыта высказывались еще в начале 2000-х гг. [17].

²³ Законопроект № 1050064-8 «О внесении изменений в Закон Российской Федерации „О недрах“ и в статьи 131 и 133 Федерального закона „О несостоятельности (банкротстве)“ (в части регулирования вопросов рекультивации земель)». URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/1050064-8> (дата обращения: 21.03.2026).

²⁴ Пояснительная записка к проекту федерального закона «О внесении изменений в Закон Российской Федерации „О недрах“ и в статьи 131 и 133 Федерального закона „О несостоятельности (банкротстве)“». URL: https://sozd.duma.gov.ru/bill/1050064-8#bh_note (дата обращения: 21.03.2026).

окружающей среды для почв (земель)», либо «значениям концентраций загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, на сопредельной территории аналогичного целевого назначения и вида использования». Оценивать результаты рекультивации должна специальная комиссия по приемке работ (п. 39 Правил рекультивации), в состав которой могут входить: представители органа государственной власти, уполномоченного на предоставление земельных участков, находящихся в федеральной собственности, арендаторы, землепользователи, землевладельцы, которым предоставлены такие земельные участки, а также представители Федеральной службы по надзору в сфере природопользования или Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору (для земель сельскохозяйственного назначения).

Пример решений Арбитражного суда Красноярского края²⁵ показывает, что позиция правоприменителя сводится к обязанности регионального органа исполнительной власти принимать лесные участки на основании поступившего заявления от арендатора вне зависимости от наличия или отсутствия материалов, подтверждающих выполнение необходимых по проекту работ, в том числе актов рекультивации земель. Согласно ст. 622 ГК РФ²⁶ арендодатель не вправе отказаться от приемки имущества при прекращении договора аренды даже если имущество возвращается арендатором не в состоянии, обусловленном договором. В качестве защиты своих интересов при нарушении арендатором обязанности возвратить имущество в состоянии, предусмотренном соглашением сторон, арендодатель может обратиться в арбитражный суд после приемки земель.

Отбросив предположение, что в основе договора на предоставление права пользования недрами лежит, в том числе, принцип добросовестности, можно констатировать, что на практике у недропользователя возникают стимулы вернуть собственнику земельный участок в

ненадлежащем состоянии, поскольку издержки такого оппортунистического поведения существенно меньше стоимости рекультивационных работ надлежащего качества. Важно отметить, что «реальная стоимость работ по восстановлению нарушенного состояния окружающей среды может значительно превышать стоимость работ по рекультивации нарушенных земель»²⁷, а в случае несвоевременной реализации таких работ возможно возрастающее негативное воздействие на компоненты окружающей среды, например снижение качества почв на прилегающей территории в результате развития эрозии, а также ухудшение состояния поверхностных водных объектов в результате регулярного поступления взвешенных и иных веществ [18; 19].

Так, за невыполнение обязанностей по рекультивации земель юридическому лицу грозит наложение административного штрафа в размере от 400 до 700 тыс. руб.²⁸, в то время как стоимость реализации полноценного проекта восстановления нарушенных земель измеряется миллионами или десятками миллионов рублей. Срок давности привлечения к административной ответственности по статье 8.7 КоАП РФ составляет один год. Оно может быть признано дялщимся правонарушением, и по смыслу ч. 2 ст. 4.5 КоАП РФ считается совершенным в день обнаружения. Повторное привлечение лица к ответственности за тот же период, в течение которого совершается действие или бездействие, то есть длительное непрекращающееся невыполнение или ненадлежащее выполнение предусмотренных законом обязанностей (абз. 2 п. 14 Постановления Пленума Верховного Суда РФ от 24.03.2005 № 5 «О некоторых вопросах, возникающих у судов при применении Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях»), не допускается.

Одновременно с постановлением выносится предписание об устранении правонарушения в определенный срок, невыполнение которого влечет административную ответственность по статье 19.5 КоАП РФ и наложение административного штрафа на

²⁵ Решения Арбитражного суда Красноярского края от 25.11.2016 № А33-24137/2016; от 29.10.2019 № А33-16893/2019. URL: <https://kad.arbitr.ru/> (дата обращения: 20.03.2026).

²⁶ Гражданский кодекс Российской Федерации от 30.11.1994 г. № 51-ФЗ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/7279> (дата обращения: 20.03.2026).

²⁷ Определение СК по экономическим спорам Верховного Суда РФ от 17 мая 2023 г. № 301-ЭС22-28591 по делу № А29-4305/2020. URL:

https://ras.arbitr.ru/Document/Pdf/00003b06-4989-44b0-955b-472176c6221b/46d49cee-f2ae-4adf-9df0-23bb5cfcf568/A29-4305-2020__20230517.pdf?isAddStamp=True (дата обращения: 28.03.2026).

²⁸ Статья 8.7. Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 г. № 195-ФЗ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/17704> (дата обращения: 23.03.2026).

юридических лиц от 100 до 200 тыс. руб., а повторно от 200 до 300 тыс. руб.²⁹

Понесенные недропользователем штрафные санкции в подавляющем большинстве случаев оказываются существенно ниже затрат, необходимых для рекультивации большого по площади участка водных объектов, испытавших значительную трансформацию в результате золотодобычи (Рисунок 2), а делопроизводство может растянуться на годы. Фактически, наличие утвержденного плана рекультивации нарушенных земель дает основания для уклонения от ответственности за негативные последствия проведения геологических работ.

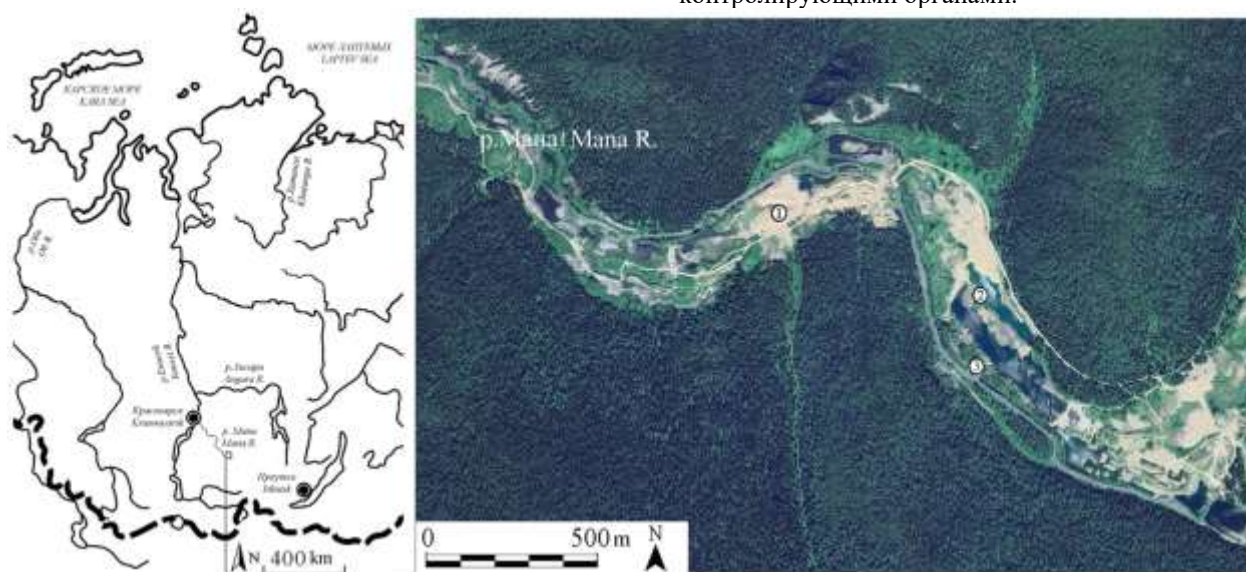


Рисунок 2. Пример масштабов техногенной трансформации ландшафтов в верхнем течении р. Мана, Красноярский край. Условные обозначения: 1 – гале-эфельные отвалы; 2 – пруд-отстойник; 3 – обводной канал.

Figure 2. The anthropized landscape in the upper reaches of the Mana River in the Krasnoyarsk Krai.

Legend: 1 – gravel and effel tailings; 2 – settling pond; 3 – diversion channel.

Источник: Google Earth

Source: Google Earth

При этом действующие подходы не предусматривают участия населения (общественных организаций) в оценке результатов указанной деятельности несмотря на то, что именно оно является наиболее заинтересованной стороной в скорейшем восстановлении исходного качества экосистем и имеет соответствующие права, гарантированные 42 статьей Конституции Российской Федерации.

Отдельной проблемой являются высокие фактические требования к членам комиссии по вопросам рекультивации земель в части их

квалификации и технического оснащения. Они должны владеть не только действующей, но и утратившей силу нормативной базой. Так, на территории Сибирского федерального округа, и, в частности, Красноярского края, большое количество лицензий на геологическое изучение и добычу россыпного золота было получено до 2018 г. Следовательно, проекты рекультивации нарушенных земель могли не соответствовать Правилам проведения рекультивации и консервации земель, которые впервые опубликованы в 2018 г.³⁰ и обновлены в 2025 г.³¹ Разработка проектов

²⁹ п. 38, п. 39 Ст. 19.5 КоАП РФ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/17704> (дата обращения: 23.03.2026).

³⁰ Утверждены Постановлением Правительства РФ от 10.07.2018 № 800.

³¹ Утверждены Постановлением Правительства РФ от 29.05.2025 № 781.

рекультивации осуществлялась в составе проектной документации по освоению недр, что значительно упрощало прохождение необходимых согласований. Например, подобными проектами предусматривалась рекультивация водоотводных каналов и отстойников по рыбохозяйственному направлению (без указания мероприятий по искусственному зарыблению), несмотря на то что подобные объекты, как правило, совершенно не пригодны для указанных целей и полностью промерзают в зимний период.

Большинство таких проектов ожидаемо не содержало мероприятий, относящихся к биологическому этапу рекультивации, а зарастание нанесенного почвенно-растительного слоя предполагалось путем естественного обсеменения.

На момент разработки проектов рекультивации нарушенных земель в период до 2018 г. подобные подходы применялись недропользователями с завидной регулярностью. Однако реализация даже таких проектов зачастую осуществлялась с нарушением требований нормативных документов, либо вовсе не совершалась в полном объеме. Соответственно, для оценки качества проведенных работ члены комиссии по приемке должны владеть нормативной базой, действовавшей на период разработки и утверждения проектов рекультивации.

Это особенно актуально в отношении гале-эфельных отвалов, являющихся неотъемлемыми спутниками разработки россыпных месторождений с использованием драг [20; 21]. При этом в долинах рек формируется техногенный рельеф, отличный от исходного на десятки метров по амплитуде высот. При планировании технического этапа восстановления таких земель недропользователи в качестве направления рекультивации зачастую выбирают создание задернованных участков природоохранного назначения³². Это позволяет минимизировать усилия на выравнивание гале-эфельных отвалов на нарушенных землях, имеющих платообразную форму рельефа.

При этом известно, что нарушенные участки с распространением несвязных, подвижных перемытых аллювиальных отложений, отложений песчано-щебнистого и дресвяно-песчаного состава, являются малопригодными для целей рекультивации³³. Для подобных участков

возможным направлением биологической рекультивации может быть травосеяние с противоэрозионной целью. Без искусственного формирования на их поверхности достаточного по мощности почвенно-растительного слоя зарастание подобных отложений затруднено или невозможно: они подвергаются эрозии, обеспечивая поступление в водные объекты взвешенных частиц и ухудшая качество поверхностных вод.

Разумеется, на этапе разработки проекта рекультивации далеко не всегда можно спрогнозировать, какие грунты окажутся на дневной поверхности спустя десятилетие работ по золотодобыче. Соответственно, от лиц, принимающих выполненные работы по рекультивации, требуется умение оценивать корректность реализованных решений на месте.

Кроме того, некорректное планирование нарушенной территории, выполненное на техническом этапе, отступление от утвержденных решений проекта рекультивации, может привести к заболачиванию переданного участка, угнетению и гибели лесных насаждений, что противоречит требованиям статьи 60.12 Лесного кодекса Российской Федерации³⁴. В качестве иллюстрации можно привести пример участка, который был формально принят после рекультивации по лесохозяйственному направлению, в долине р. Посольная Красноярского края (Рисунок 3). На фотографии зафиксированы ключевые признаки того, что даже технический этап рекультивации не был завершен в полном объеме. В частности, на заднем плане видны не демонтированные остатки деревянного сооружения. Поверхность участка не выровнена, сохранились техногенные формы рельефа высотой свыше 2 м: каменисто-песчаные (гале-эфельные) отвалы, оставшиеся после отработки долины установками обогащения, галечные и крупноглыбовые отвалы вскрышных пород. Почвенный покров отсутствует, поверхность участка сформирована техногенными поверхностными образованиями, относящимися к группе натурфабрикатов, подгруппе литостратов. В соответствии с Классификацией почв России 2004 г.³⁵ данные образования не относятся к почвам, а являются субстратами, ценность и плодородие которых весьма низкие.

³² Такая возможность предусматривалась в ГОСТ 17.5.1.02-85, а также сменившем его ГОСТ Р 59060-2020 «Охрана природы. Земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации».

³³ ГОСТ 17.5.1.03-86 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель».

³⁴ Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ. Статья 60.12. «Общие положения об охране лесов от загрязнения и иного негативного воздействия». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/24637> (дата обращения: 29.03.2026).

³⁵ Классификация почв России. Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2004. URL: <https://www.esoil.ru/upload/iblock/d16/dt2d9olrzww1xsqjx867skjw3mq8d8rz.pdf> (дата обращения: 09.05.2026).

Для успешного лесовосстановления при проведении рекультивационных работ особую важность имеет этап нанесения плодородного слоя почвы. Большинство проектов геологического изучения и добычи россыпного золота в долинах рек на территории Красноярского края предусматривают сохранение почвенно-растительного слоя путем его уборки и складирования для целей последующей рекультивации. Это позволяет недропользователям значительно сократить расходы на восстановление компонентов окружающей среды, поскольку необходимость завоза плодородного грунта в большом объеме является наиболее затратной частью для проведения технического этапа рекультивации. Однако на практике снятие плодородного слоя и его складирование зачастую не осуществляется, что не позволяет обеспечить высокое качество рекультивации нарушенных земель.

Следует заметить, что в соответствии с действующим ГОСТ 17.5.3.06-85 «Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ», объем почвенного покрова, складированного в буртах, при разработке участка

площадью 5 га не может составлять менее 10 тыс. куб. м. Это значительный объем почвенного материала, хорошо видный невооруженным глазом. По этой причине критерий наличия буртов необходимо включить в планы проверок деятельности золотодобывающих компаний в рамках действующих лицензий надзорными органами, в первую очередь, природоохранной прокуратурой и Росприроднадзором.

С правовой точки зрения отсутствие почвенного покрова, складированного в буртах, соразмерных площади участка, подпадает под действие сразу двух статей КоАП РФ. Во-первых, технически невозможным становится проведение заключительного этапа рекультивации — нанесение плодородного слоя. Это является прямым невыполнением обязательств, предусмотренных проектом рекультивации, что квалифицируется по ч. 1 ст. 8.7 КоАП РФ. Во-вторых, невыполнение недропользователем работ по снятию и сохранению почвы нарушает требования ст. 13 Земельного кодекса РФ³⁶, что подпадает под действие ч. 2 ст. 8.6 КоАП РФ. Причем штрафы по ст. 8.6 и ст. 8.7 КоАП РФ могут быть назначены одновременно, поскольку они охраняют разные правоотношения.

³⁶ Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 г. № 136-ФЗ. URL:

<http://www.kremlin.ru/acts/bank/17478> (дата обращения: 04.04.2026).



Рисунок 3. Натурный фотоснимок участка, принятого после рекультивации по лесохозяйственному направлению, в долине р. Посольная, правого притока р. Енисей, Красноярский край
Figure 3. The land plot, which was accepted by the commission after the forestry reclamation in the valley of the Posolnaya River, a right tributary of the Yenisei River in the Krasnoyarsk Krai

Источник: фото авторов
Source: photo by authors

В некоторых случаях осуществить контроль качества рекультивации в части удовлетворительного выравнивания территории возможно лишь с применением специализированного оборудования, без которого предъявить обоснованные замечания затруднительно. Не располагая специальным инструментарием, невозможно определить мощность нанесенного почвенного слоя, установить границы участка. И если проверить соответствие восстановленных земель установленным нормативам качества окружающей среды можно камерально, то есть на основе предоставленных лабораторных протоколов, то указанные выше параметры можно оценить исключительно натурно.

Таким образом, знание всей специфики как действующих, так и утративших силу нормативных документов критически необходимо для качественной оценки проведенных рекультивационных работ. Решение этой задачи требует привлечения нескольких специалистов или экспертов в соответствующих областях. Ситуацию осложняет и дальнейшее расширение законодательной базы, например, введение с 01.01.2026 г. ГОСТ Р 72033-2025 «Национальный стандарт Российской Федерации. Охрана окружающей среды. Биологическое разнообразие. Реставрация лесной растительности на отвалах горных пород. Основные положения»³⁷. Рядовые сотрудники лесничеств и представители районной

³⁷ Утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 мая 2025 г. № 402-ст.

администрации в должной мере не обладают необходимыми компетенциями.

В некоторой степени проблема может быть минимизирована за счет привлечения независимых общественных экологических экспертов. Эта возможность зафиксирована в ст. 68 Федерального закона «Об охране окружающей среды»³⁸. Однако зафиксированная в Правилах рекультивации (как прошлой, так и действующей редакции) процедура приемки работ не предусматривает участия в ней представителей общественного контроля, несмотря на то что наиболее заинтересованным в проведении качественной рекультивации является именно местное население.

Отдельным источником нарушения интересов населения может стать потенциальная заинтересованность в отсутствии полной и объективной оценки качества рекультивационных работ со стороны представителей комиссии по приемке, на что имеется ряд причин. Одна из них заключается в том, что на многих участках лесного фонда в пределах водоохранных зон присутствуют экологические обременения [22], под которыми авторы настоящей статьи понимают ограничения дальнейшего использования участка, возникшие в результате недобросовестного выполнения обязательств недропользователя по проведению рекультивации участков, на которых велась добыча полезных ископаемых в долинах рек. В пределах таких территорий ранее лес был сведен, а возобновление древесной растительности не произошло либо находится на начальных стадиях естественного лесовозобновления. В Государственном лесном реестре такая информация не учитывается, поэтому дальнейшее лесопользование не ограничено, что фактически приводит к сведению лесов в водоохранных зонах.

Кроме того, протоколы о правонарушениях, связанных с невыполнением обязанностей по рекультивации земель, обязательных мероприятий по улучшению земель и охране почв, также могут составлять должностные лица государственных учреждений, осуществляющих федеральный государственный лесной надзор (п. 8 ч. 5 ст. 28.3 КоАП РФ). В этом случае также возможно возникновение конфликта интересов, влекущее потенциальный ущерб для населения.

Обсуждение

Множественные примеры деградации окружающей среды в результате золотодобычи на Урале [15], в Сибири [13; 23] и на Дальнем Востоке [12; 21; 24] подтверждают, что действующие механизмы предотвращения и компенсации экологического ущерба неоптимальны. В

академической литературе обсуждение проблем, связанных с таким ущербом, как правило, сводится к выбору способа интернализации возникающих внешних эффектов [25; 26]. Одним из таких способов можно считать регулирование вопроса рекультивации нарушенных лесных земель.

В отечественной литературе проблема рекультивации земель поднимается регулярно, однако большая часть исследований по теме касается вопросов выбора направления рекультивации [15; 27], методологии оценки качества ее проведения [28; 29], оценки ущерба от недобросовестно проведенных работ [13]. Настоящая статья рассматривает узкий аспект этой проблемы, связанный с недостатками процесса приемки рекультивационных работ. Проведенный нами анализ действующих практик нормативного регулирования и приемки работ по рекультивации нарушенных лесных земель выявил следующие несовершенства.

1. Отсутствие рекультивации земель после геологических работ не дает органам власти оснований отказать недропользователю в приемке арендованного участка.

2. Ущерб добывающих компаний от штрафных санкций за невыполнение обязанностей по рекультивации не сопоставим даже со стоимостью таких работ, не говоря о стоимости компенсации потенциального ущерба окружающей среде. Недобросовестным компаниям выгодно законно оплачивать сравнительно небольшие штрафы, размер которых непропорционален наносимому ими экологическому ущербу.

3. Полная и объективная оценка качества проведенных рекультивационных работ требует высокой квалификации, наличия необходимого оборудования и отсутствия конфликта интересов у членов комиссии по приемке. На данный момент эти вопросы никак не регламентируются.

4. Местное население не имеет возможностей контроля за процессом восстановления окружающей среды, при этом испытывая наибольшее влияние негативных внешних эффектов, включающих как прямой вред здоровью, так и потери доступа к привычным рекреационным услугам рек и лесов.

В совокупности указанные пункты способствуют снижению качества оценки результатов проведения рекультивации лесных земель, что в конечном итоге нарушает общественные интересы.

Заключение

Как показано в настоящей работе, в сложившихся институциональных условиях

³⁸ Статья 68 «Общественный контроль в области охраны окружающей среды (общественный экологический контроль)» Федерального закона от

10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/17718> (дата обращения: 20.03.2026).

нагрузка на окружающую среду в результате сохранения высоких темпов освоения россыпного золота будет возрастать. Авторы убеждены, что интенсификация недропользования должна сопровождаться учетом долгосрочных интересов всех акторов природопользования: промышленников, населения и государства, что будет способствовать максимизации общественной полезности. Для достижения этой цели в настоящей работе предлагаются следующие изменения в области действующих правил проведения рекультивации нарушенных земель и дальнейшего мониторинга за их состоянием.

1. Необходимо разработать детализирующие документы — методические указания и практические рекомендации по приемке рекультивационных работ по отраслям³⁹. Рекомендации должны содержать сведения о минимальной квалификации членов специальной комиссии по вопросам приемки результатов работ, а также о минимальном уровне технического оснащения комиссии. В связи с высокой стоимостью необходимого оборудования оптимальным представляется вариант, при котором расходы по обеспечению им комиссии несет недропользователь или представитель подрядной организации, выполняющей рекультивацию нарушенных земель.

2. С целью повышения объективности работы комиссий, принимающих результаты работ по рекультивации земель, Правила рекультивации следует дополнить в части пунктов 40 и 41 возможностью включения в состав комиссий представителей организаций, объединений, общественных экологических инспекторов, осуществляющих общественный экологический контроль в области охраны окружающей среды.

3. Необходимо предусмотреть возможность проведения долгосрочного экологического мониторинга на рекультивированных участках лесных земель. В настоящее время наблюдение за состоянием принятого участка не является ответственностью государства. Как известно, уже в течение первых пяти лет после проведения рекультивационных работ могут наблюдаться существенные масштабы гибели саженцев

древесных культур, вторичное проседание грунта или всплытие загрязнений на водную поверхность.

4. С целью сохранения окружающей среды крупных поселений, бесперебойной работы критически важных инженерных объектов, питающих водой населенные пункты и промышленные предприятия, предлагаем запретить разведку и добычу золота в пределах водоохранных зон рек, в случаях, если указанные объекты располагаются менее, чем в 100 км выше по течению от городов с численностью населения свыше 250 тыс. чел. Согласно Стратегии пространственного развития Российской Федерации⁴⁰ именно такие поселения играют ключевую роль в экономике страны, поскольку концентрируют наиболее высокую плотность населения и предприятий, в том числе непрерывного цикла. В случае аварийной ситуации на участке золотодобычи, которая может сопровождаться повышенным уровнем загрязнения реки, обеспечить такой город должным объемом воды необходимого качества крайне затруднительно. При этом расстояние в 100 км до города позволяет при средней скорости реки обеспечить запас времени в 24 часа при угрозе чрезвычайной ситуации для своевременного информирования⁴¹ и защиты населения, снижения ущерба и подготовки сил к реагированию. Кроме того, такое расстояние позволяет минимизировать и ущерб от перманентного поступления взвешенных веществ с участков активной добычи россыпного золота за счет естественного процесса снижения концентрации примесей по мере течения реки.

5. Исходя из фундаментальных представлений о свойствах водоохранных лесов, их высокого экологического и санитарно-гигиенического значения, а также биологической уязвимости, необходимо внесение дополнений в Правила рекультивации, определяющих, что «в пределах водоохранных зон самозарастание не может рассматриваться в качестве пассивного метода биологической рекультивации, а создание защитных лесных насаждений на таких участках путем проведения работ по искусственному лесовосстановлению должно являться неотъемлемой частью проекта рекультивации земель».

³⁹ Примером реализации аналогичного предложения являются «Методические указания по организации и осуществлению контроля за горнотехнической рекультивацией земель, нарушенных горными разработками» РД 07-35-93, утвержденные постановлением коллегии Госгортехнадзора России от 10.09.1993 № 7.

⁴⁰ Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с

прогнозом до 2036 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 г. № 4146-р.

⁴¹ Сроки информирования отражены в Приказе МЧС России от 11 января 2021 г. № 2 «Об утверждении Инструкции о сроках и формах представления информации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

6. Учитывая ценность сохранения плодородного слоя почвы для последующей рекультивации земель, следует включить в планы проверок деятельности золотодобывающих компаний надзорными органами мероприятия по проверке наличия буртов, соразмерных площади разрабатываемого участка. Такой критерий позволяет без специального оборудования с достаточной точностью оценить уровень выполнения недропользователем обязательств по рекультивации земель.

Анализируемая ситуация требует комплексного подхода к эколого-экономическому регулированию вопроса рекультивации нарушенных земель, сочетающего в себе как экономические, так и административные меры. В случае принятия законопроекта об обязательности

создания рекультивационного фонда для получения лицензии на пользование недрами проблема полного отсутствия рекультивационных работ может быть решена, а количество недобросовестных игроков рынка добычи россыпного золота уменьшится.

Предлагаемые нами изменения могут значимо усилить этот эффект за счет улучшения качества контроля и надзора за проведением рекультивационных работ на лесных участках.

Список литературы

1. Филатова М.Ю., Крупская Л.Т., Бубнова М.Б., Леоненко А.В. Оценка экологической ситуации в границах влияния золотодобычи (для обоснования создания лесных плантаций) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 8. – С. 27–44. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_27. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54482012>.
2. Hou Y., Zhao Y., Lu J., Wei Q., Zang L., Zhao X. Environmental contamination and health risk assessment of potentially toxic trace metal elements in soils near gold mines – A global meta-analysis. *Environmental Pollution*. 2023; 330: Art. no. 121803. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121803.
3. Myagkaya I.N., Saryg-ool B.Y., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., Lazareva E.V. Environmental and human health risk assessment of soils in areas of ore mineralization and past gold-mining activity. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024; 31(35): 47923–47945. DOI: 10.1007/s11356-024-34242-5.
4. Chen L., Wang J., Guo X., Wu H., He H., Fang L. Pollution characteristics and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around China's gold mines: a meta-analysis. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022; 44(11): 3765–3777. DOI: 10.1007/s10653-021-01175-8.
5. Leyton-Flor S.A., Sangha K. The socio-ecological impacts of mining on the well-being of Indigenous Australians: A systematic review. *The Extractive Industries and Society*. 2024; 17: Art. no. 101429. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101429.
6. Leyton-Flor S.A., Sangha K., Howey K. Assessing environmental liabilities of mining in Northern Australia: A case study of the McArthur River Mine. *The Extractive Industries and Society*. 2024; 20: Art. no. 101562. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101562.
7. Zenebe M., Birhane E., Haile M., Tadesse T., Teka K., Araya T. Implication of traditional gold mining and organic carbon dynamics across land-use and land-cover types in Tigray, Ethiopia. *Carbon Management*. 2026; 17(1): Art. no. 2627031. DOI: 10.1080/17583004.2026.2627031.
8. Dube N., Moyo F., Sithole M., Ncube G., Nkala P., Tshuma N., Maphosa M., Mabhena C. Institutional exclusion and the tragedy of the commons: Artisanal mining in Matabeleland South Province, Zimbabwe. *The Extractive Industries and Society*. 2016; 3(4): 1084–1094. DOI: 10.1016/j.exis.2016.08.006.
9. Kahhat R., Parodi E., Larrea-Gallegos G., Mesta C., Vázquez-Rowe I. Environmental impacts of the life cycle of alluvial gold mining in the Peruvian Amazon rainforest. *Science of The Total Environment*. 2019; 662: 940–951. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.246.
10. Quash Y., Kross A., Jaeger J.A.G. Assessing the impact of gold mining on forest cover in the Surinamese Amazon from 1997 to 2019: A semi-automated satellite-based approach. *Ecological Informatics*. 2024; 80: Art. no. 102442. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102442.
11. Липина Л.Н., Вдовенко А.В. К вопросу рекультивации месторождений россыпного золота в Хабаровском крае // Экология промышленного производства. – 2020. – № 2 (110). – С. 45–50. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43007464>.
12. Замана Л.В., Вахнина И.Л. Влияние россыпной золотодобычи на природные комплексы речных долин бассейна реки Амур (Восточное Забайкалье, Россия) // Геосферные исследования. – 2020. – № 2. – С. 83–89. – DOI: 10.17223/25421379/15/7. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43766749>.

13. Bortnikova S., Olenchenko V., Gaskova O., Yurkevich N., Abrosimova N., Shevko E., Edelev A., Korneeva T., Provornaya I., Eder L. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia). *Applied Geochemistry*. 2018; 93: 145–157. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.04.009.
14. Корчагин И.Е., Залесов С.В., Осипенко Р.А. Динамика таксационных показателей искусственных сосновых древостоев на рекультивированном золоотвале // *Природообустройство*. – 2024. – № 3. – С. 106–111. – DOI: 10.26897/1997-6011-2024-3-106-111. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68573607>.
15. 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: 10.51318/FRET.2023.37.61.002. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54376535>.
16. Pigou A.C. *The Economics of Welfare*. London: Macmillan and Co., 1920. – 1022 p. – URL: <https://archive.org/details/dli.bengal.10689.4260>.
17. Бур А., Порунов А.Н. Налог на добычу полезных ископаемых и рекультивация земель // *Вопросы экономики*. – 2003. – № 7. – С. 155–157. – DOI: 10.32609/0042-8736-2003-7-155-157. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18243099>.
18. Родин А.Р., Родин С.А. Создание лесных энергетических плантаций // *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной Вестник*. – 2008. – № 1. – С. 178–182. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10331756>.
19. Дебеляя И.Д. Сохранение экологического равновесия – важнейший критерий устойчивого развития (на примере обрабатываемых месторождений россыпного золота) // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т. 14. – № 1–9. – С. 2412–2414. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18873527>.
20. Мирзеханов Г.С., Мирзеханова З.Г. Прогнозная оценка ресурсного потенциала гале-эфельных отвалов россыпных месторождений золота Дальнего Востока России // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2020. – № 2. – С. 111–120. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200213. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43017847>.
21. Гребенщикова Е.А., Шелковкина Н.С., Горбачева Н.А. Рекультивация нарушенных земель при добыче полезных ископаемых // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2021. – № 5. – С. 32–37. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46297665>.
22. Жаворонкова Н.Г., Агафонов В.Б. Правовые проблемы возмещения прошлого (накопленного) экологического вреда в сфере недропользования // *Актуальные проблемы российского права*. – 2016. – № 1 (62). – С. 85–92. – DOI: 10.17803/1994-1471.2016.62.1.085-092. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25898733>.
23. Фатуева Ю.И., Швецова Л.В., Швыдких В.Э. Тягун-Таловское месторождение золота и его влияние на природные комплексы черневых лесов // *География и природопользование Сибири*. – 2017. – № 24. – С. 143–154. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32541916>.
24. Жмур Н.С., Улатов А.В., Лапшин О.М. Проблемы деградации экосистем лососевых водоемов в условиях добычи золота на Камчатке // *Экология и промышленность России*. – 2014. – № 4. – С. 42–47. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21323630>.
25. Шаститко А.Е., Павлова Н.С. Коузианство против пигувианства: идеи, ценности, перспективы // *Вопросы экономики*. – 2022. – № 1. – С. 23–46. – DOI: 10.32609/0042-8736-2022-1-23-46. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47567501>.
26. Данилов-Данильян В.И. Теорема Коуза: попытка диагноза // *Вестник Российской академии наук*. – 2012. – Т. 82. – № 9. – С. 814–822. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=pbwggj>.
27. Тимофеева С.С., Ульрих Д.В., Тимофеев С.С. Фитомайнинг как технология ревитализации территории меднорудных месторождений Южного Урала // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № S6. – С. 3–16. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-3-16. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42432489>.
28. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В. Правовое регулирование рекультивационных работ при недропользовании: международный обзор // *ЭКО*. – 2021. – № 12 (570). – С. 140–160. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-12-140-160. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47242318>.
29. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Пустохина Н.Г. Методическое обеспечение оценки эффективности рекультивационных работ в России: специфика развития // *ЭКО*. – 2023. – № 8 (590). – С. 172–192. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-8-172-192. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54230576>.

References

1. Filatova M.Yu., Krupskaya L.T., Bubnova M.B., Leonenko A.V. Otsenka ekologicheskoy situatsii v granitsakh vliyaniya zolotodobychi (dlya obosnovaniya sozdaniya lesnykh plantatsiy). [Assessment of the environmental situation within the boundaries of gold mining influence (to justify the creation of forest plantations)]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2023;(8):27-44. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54482012>.
2. Hou Y., Zhao Y., Lu J., Wei Q., Zang L., Zhao X. Environmental contamination and health risk assessment of potentially toxic trace metal elements in soils near gold mines – A global meta-analysis. *Environmental Pollution*. 2023;330: Art. no. 121803. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121803.
3. Myagkaya I.N., Saryg-ool B.Y., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., Lazareva E.V. Environmental and human health risk assessment of soils in areas of ore mineralization and past gold-mining activity. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31(35):47923-47945. DOI: 10.1007/s11356-024-34242-5.
4. Chen L., Wang J., Guo X., Wu H., He H., Fang L. Pollution characteristics and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around China's gold mines: a meta-analysis. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022;44(11):3765-3777. DOI: 10.1007/s10653-021-01175-8.
5. Leyton-Flor S.A., Sangha K. The socio-ecological impacts of mining on the well-being of Indigenous Australians: A systematic review. *The Extractive Industries and Society*. 2024;17: Art. no. 101429. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101429.
6. Leyton-Flor S.A., Sangha K., Howey K. Assessing environmental liabilities of mining in Northern Australia: A case study of the McArthur River Mine. *The Extractive Industries and Society*. 2024;20: Art. no. 101562. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101562.
7. Zenebe M., Birhane E., Haile M., Tadesse T., Teka K., Araya T. Implication of traditional gold mining and organic carbon dynamics across land-use and land-cover types in Tigray, Ethiopia. *Carbon Management*. 2026;17(1): Art. no. 2627031. DOI: 10.1080/17583004.2026.2627031.
8. Dube N., Moyo F., Sithole M., Ncube G., Nkala P., Tshuma N., Maphosa M., Mabheba C. Institutional exclusion and the tragedy of the commons: Artisanal mining in Matabeleland South Province, Zimbabwe. *The Extractive Industries and Society*. 2016;3(4):1084-1094. DOI: 10.1016/j.exis.2016.08.006.
9. Kahhat R., Parodi E., Larrea-Gallegos G., Mesta C., Vázquez-Rowe I. Environmental impacts of the life cycle of alluvial gold mining in the Peruvian Amazon rainforest. *Science of The Total Environment*. 2019;662:940-951. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.246.
10. Quash Y., Kross A., Jaeger J.A.G. Assessing the impact of gold mining on forest cover in the Surinamese Amazon from 1997 to 2019: A semi-automated satellite-based approach. *Ecological Informatics*. 2024;80: Art. no. 102442. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102442.
11. Lipina L.N., Vdovenko A.V. K voprosu rekul'tivatsii mestorozhdeniy rossypnogo zolota v Khabarovskom krae. [On the issue of reclamation of placer gold deposits in Khabarovsk Krai]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva = Ecology of Industrial Production*. 2020;(2(110)):45-50. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43007464>.
12. Zamana L.V., Vakhnina I.L. Vliyanie rossypnoy zolotodobychi na prirodnye komplekсы rechnykh dolin basseyna reki Amur (Vostochnoe Zabaykal'e, Rossiya). [Influence of placer gold mining on the natural complexes of river valleys of the Amur River basin (Eastern Transbaikalia, Russia)]. *Geosfernye issledovaniya = Geosphere Research*. 2020;(2):83-89. (In Russ.). DOI: 10.17223/25421379/15/7. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43766749>.
13. Bortnikova S., Olenchenko V., Gaskova O., Yurkevich N., Abrosimova N., Shevko E., Edelev A., Korneeva T., Provornaya I., Eder L. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region, Russia). *Applied Geochemistry*. 2018;93:145-157. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.04.009.
14. Korchagin I.E., Zalesov S.V., Osipenko R.A. Dinamika taksatsionnykh pokazateley iskusstvennykh osnovnykh drevestoev na rekul'tivirovannom zolootvale. [Dynamics of taxation indicators of artificial pine stands on a reclaimed ash dump]. *Prirodoobustroystvo = Environmental Engineering*. 2024;(3):106-111. (In Russ.). DOI: 10.26897/1997-6011-2024-3-106-111. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68573607>.
15. Petrov A.I., Kotova V.S., Osipenko R.A., Zalesov S.V. Lesokhozyaystvennoe napravlenie rekul'tivatsii poligonov dobychi rassypnogo zolota. [Forestry direction of reclamation of placer gold mining sites]. *Les Rossi i khozyaystvo v nikh = Forests of Russia and Economy in Them*. 2023;(2(85)):16-23. (In Russ.). DOI: 10.51318/FRET.2023.37.61.002. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54376535>.
16. Pigou A.C. The Economics of Welfare. London: Macmillan and Co., 1920. 1022 p. URL: <https://archive.org/details/dli.bengal.10689.4260>.

17. Buer A., Porunov A.N. Nalog na dobychu poleznykh iskopaemykh i rekul'tivatsiya zemel'. [Mineral extraction tax and land reclamation]. *Voprosy ekonomiki = Economic Issues*. 2003;(7):155-157. (In Russ.). DOI: 10.32609/0042-8736-2003-7-155-157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18243099>.
18. Rodin A.R., Rodin S.A. Sozdanie lesnykh energeticheskikh plantatsiy. [Creation of forest energy plantations]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy Vestnik = Bulletin of Moscow State Forest University – Forestry Bulletin*. 2008;(1):178-182. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10331756>.
19. Debelaya I.D. Sokhranenie ekologicheskogo ravnovesiya – vazhneyshiy kriteriy ustoychivogo razvitiya (na primere otrabatyvaemykh mestorozhdeniy rossypnogo zolota). [Preservation of ecological balance – the most important criterion for sustainable development (on the example of placer gold deposits being mined)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1-9):2412-2414. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18873527>.
20. Mirzekhanov G.S., Mirzekhanova Z.G. Prognosticheskaya otsenka resursnogo potentsiala gale-efel'nykh otvalov rossypnykh mestorozhdeniy zolota Dal'nego Vostoka Rossii. [Predictive assessment of the resource potential of pebble-efel dumps of placer gold deposits in the Russian Far East]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Physical and Technical Problems of Mineral Development*. 2020;(2):111-120. (In Russ.). DOI: 10.15372/FTPRPI20200213. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43017847>.
21. Grebenshchikova E.A., Shelkovkina N.S., Gorbacheva N.A. Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' pri dobyche poleznykh iskopaemykh. [Reclamation of disturbed lands during mineral extraction]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*. 2021;(5):32-37. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46297665>.
22. Zhavoronkova N.G., Agafonov V.B. Pravovye problemy vozmeshcheniya proshlogo (nakoplenno) ekologicheskogo vreda v sfere nedropol'zovaniya. [Legal problems of compensation for past (accumulated) environmental damage in the field of subsoil use]. *Aktual'nye problemy rossiyskogo prava = Current Problems of Russian Law*. 2016;(1(62)):85-92. (In Russ.). DOI: 10.17803/1994-1471.2016.62.1.085-092. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25898733>.
23. Fatueva Yu.I., Shvetsova L.V., Shvydkikh V.E. Tyagun-Talovskoe mestorozhdenie zolota i ego vliyanie na prirodnye komplekсы chernykh lesov. [Tyagun-Talovskoye gold deposit and its impact on the natural complexes of black forests]. *Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri = Geography and Nature Management of Siberia*. 2017;(24):143-154. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32541916>.
24. Zhmur N.S., Ulatov A.V., Lapshin O.M. Problemy degradatsii ekosistem lososevykh vodoemov v usloviyakh dobychi zolota na Kamchatke. [Problems of degradation of salmon reservoir ecosystems under gold mining conditions in Kamchatka]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2014;(4):42-47. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21323630>.
25. Shastitko A.E., Pavlova N.S. Kouzianstvo protiv piguvianstva: idei, tsennosti, perspektivy. [Coasianism vs. Pigouvianism: ideas, values, prospects]. *Voprosy ekonomiki = Economic Issues*. 2022;(1):23-46. (In Russ.). DOI: 10.32609/0042-8736-2022-1-23-46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47567501>.
26. Danilov-Danil'yan V.I. Teorema Kouza: popytka diagnoza. [The Coase theorem: an attempt at diagnosis]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012;82(9):814-822. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=pbwggj>.
27. Timofeeva S.S., Ul'rikh D.V., Timofeev S.S. Fitomayning kak tekhnologiya revitatizatsii territorii mednorudnykh mestorozhdeniy Yuzhnogo Urala. [Phytomining as a technology for revitalization of copper ore deposits in the Southern Urals]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020;(S6):3-16. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-3-16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42432489>.
28. Ignat'eva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V. Pravovoe regulirovanie rekul'tivatsionnykh rabot pri nedropol'zovanii: mezhdunarodnyy obzor. [Legal regulation of reclamation works in subsoil use: an international review]. *EKO = ECO*. 2021;(12(570)):140-160. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-12-140-160. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47242318>.
29. Ignat'eva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Pustokhina N.G. Metodicheskoe obespechenie otsenki effektivnosti rekul'tivatsionnykh rabot v Rossii: spetsifika razvitiya. [Methodological support for evaluating the effectiveness of reclamation works in Russia: development specifics]. *EKO = ECO*. 2023;(8(590)):172-192. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-8-172-192. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54230576>.

Сведения об авторах

Шарафутдинов Руслан Аглямич — канд. геогр. наук, директор Института экологии и географии Сибирского федерального университета, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0282-9133>, e-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru.

Пыжев Антон Игоревич — канд. экон. наук, заведующий лабораторией экономики климатических изменений и экологического развития Сибирского федерального университета, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>, e-mail: apyzhev@sfu-kras.ru.

✉ *Гордеев Роман Викторович* — канд. экон. наук, старший научный сотрудник лаборатории экономики климатических изменений и экологического развития Сибирского федерального университета, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>, e-mail: rgordeev@sfu-kras.ru.

Митев Александр Росенович — старший преподаватель Института экологии и географии Сибирского федерального университета, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-4867>, e-mail: a.r.mitev@gmail.com.

Information about the authors

Ruslan A. Sharafutdinov – PhD in Geography, Head of School of Ecology and Geography, Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0282-9133>, e-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru.

Anton I. Pyzhev – PhD in Economics, Head of Laboratory for Economics of Climate Change and Environmental Development, Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>, e-mail: apyzhev@sfu-kras.ru.

✉ *Roman V. Gordeev* – PhD in Economics, Senior researcher in Laboratory for Economics of Climate Change and Environmental Development, Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>, e-mail: rgordeev@sfu-kras.ru.

Aleksandr R. Mitev – Senior lecturer in School of Ecology and Geography, Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-4867>, e-mail: a.r.mitev@gmail.com.

✉ Для контактов | Corresponding author

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2026 Том 16 № 2 (62)

Подписано в печать 23.06.2026. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет .2026. Цена р.

Усл. печ. л. 39,13. Уч.-изд. л. 69,3. Тираж 1000 экз. Заказ

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
2026 Vol. 16 № 2 (62)

Signed to be published 23.06.2026. Format 60×90 1/8.
Publication date .2026. Price rub.
Cond. print. sh. 39,13. Acc.-print. sh. 69,3. Printing 1000 copies. Order

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