

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2025 Том 15 № 3 (59)

- Эффективность выделения ДНК из листьев дуба черешчатого (*Q. robur* L.) и хвои сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)
- Углеродный налог на экспорт лесоматериалов и пиломатериалов как мера национальной промышленной и климатической политики
- Моделирование влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в дорожной одежде лесотранспортной системы



ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**Научный журнал
2025 Том 15 № 3 (59)**

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., чл.-корр. РАН А.А. Сириц (Россия)
2012-2023

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», 2025

FORESTRY ENGINEERING

JOURNAL

Scientific Journal
2025 Vol. 15 № 3 (59)

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. A.A. Sirin (Russia) 2012-2023

Dr., Prof. D.N. Afonichev (Russia)

Dr., Prof. E.V. Ageev (Russia)

Dr., Prof. L.I. Belchinskaya (Russia)

Dr., Prof. N.N. Matveev (Russia)

Dr., Prof. S.M. Matveev (Russia)

Dr., Prof. A.A. Gusev (Russia)

Dr0., Prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)

Dr., Prof. S.S. Morkovina (Russia)

Dr. J. Remeš (Czech Republic)

Dr., Prof. V.A. Zelikov (Russia)

Dr., Prof. A.M. Tsypuk (Russia)

Dr., Prof. P. Tylek (Poland)

Dr., Prof. O.N. Burmistrova (Russia)

Dr., Prof. I.V. Grigoriev (Russia)

Dr., Prof. A.S. Manaenkov (Russia)

Dr., Prof. V.V. Rubtsov (Russia)

Dr., Prof. V.S. Syuney (Russia)

Dr., Prof. N.N. Kharchenko (Russia)

Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)

Dr. S.V. Rabko (Belarus)

Prof. Zhou Dingguo (PRC)

Dr., prof. A. Marcomini (Italy)

Dr., Prof. V. Podrazsky (Czech Republic)

Dr., Prof. N. Bilir (Turkey)

Dr., Prof. J. Sedliačik (Slovakia)

Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)

Dr., Prof. V. Ivetić (Serbia)

Dr., Prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)

Dr. A. Montagnoli (Italy)

Dr. Yong Pang (PRC)

Dr., Prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)

Dr., Prof. A. Kheloufi (Algeria)

Dr., Prof. C. Palaghianu (Romania)

Technical Secretary

S.Yu. Krokhotina

Typesetting

S.Yu. Krokhotina

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

Registration certificate
PI № FS77-66384 of 14.07.2016

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

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

© FSBEI HE «VSUFT», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

Брындина Л.В., Репникова Л.А., Корчагина А.Ю., Живитченко Д.И., Посметьев В.И., Мануковский А.Ю. Влияние биостимулятора на корнеобразование черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский	5
Дегтярева С.И., Одинцов А.Н., Дорофеева В.Д., Шипилова В.Ф. Взаимосвязь биометрических показателей шишек и семян <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco в условиях Центрально-Чернозёмного региона	19
Иванчина Л.А., Большаков Е.Г., Ротэрмель Э.Е. Влияние уссурийского полиграфа (<i>Polygraphus proximus</i> Blandford) на запас и на долю участия пихтовых древостоев в породном составе лесных насаждений Пермского края	37
Михайлова М.И., Чернышов М.П. Реакция семенных потомств разных экотипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах на изменение климата	55
Моксина Н.В., Братилова Н.П. Продолжительность периода вегетации яблони домашней (<i>Malus domestica</i> Borkh) в Ботаническом саду им. Вс. М. Крутовского	68
Трапезникова Е.И., Матвеев С.М. Эффективность выделения ДНК из листьев дуба черешчатого (<i>Q. robur</i> L.) и хвои сосны обыкновенной (<i>P. sylvestris</i> L.).	82
Славский В.А., Водолажский А.Н., Мироненко А.В., Майер Е.И., Ларионов М.В. Оценка антропогенных факторов и рекреационных показателей насаждений, влияющих на возникновение пожароопасной ситуации в Центральной лесостепи	101

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

Bryndina L.V., Repnikova L.A., Korchagina A.Y., Zhivitchenko D.I., Posmetyev V.I., Manukovsky A.Y. The effect of a biostimulator on the root formation of poplar cuttings Pyramidal-sedge Kamyshinsky	5
Degtyareva S.I., Odintsov A.N., Dorofeeva V.D., Shipilova V.F. Relationship between the biometric indicators of <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco cones and seeds in the Central Chernozem Region	19
Ivanchina L.A., Bolshakov E.G., Rotermel' E.E. The influence of the <i>Polygraphus proximus</i> Blandford on the stock and share of fir stands in the species composition of forest plantations in the Perm Krai	37
Mikhailova M.I., Chernyshov M.P. The reaction of seed progeny of different ecotypes of Scots pine in geographical forest crops to climate change	55
Moksina N.V., Bratilova N.P. Duration of the growing period of domestic apple tree (<i>Malus domestica</i> Borkh) in the Krutovsky Botanical garden	68
Trapeznikova E.I., Matveev S.M. Efficiency of DNA extraction from leaves of common oak (<i>Q. robur</i> L.) and needles of Scots pine (<i>P. sylvestris</i> L.).	82
Slavskiy V.A., Vodolazhskiy A.N., Mironenko A.V., Maier E.I., Larionov M.V. Assessment of anthropogenic factors and recreational indicators of plantings influencing the occurrence of a fire hazard situation in the Central forest-steppe	101

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Ветров Л.С.

Перспективы реализации лесоклиматических проектов в Российской Федерации в современных условиях 121

Гордеев Р.В., Пыжев А.И.

Углеродный налог на экспорт лесоматериалов и пиломатериалов как мера национальной промышленной и климатической политики 133

Константинов А.В., Якушева Т.В., ВYRODOVA С.А.

Научное обоснование показателей, характеризующих достижение целей адаптации к изменениям климата в лесах субъектов Российской Федерации 148

Яковенко Н.В., Сурина Е.А.

Технологии и способы восстановления нарушенных земель Крайнего Севера 166

ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

**Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н.,
Малюков С.В.**

Моделирование взаимодействия почвы с комбинированным орудием – ножевой каток и пара дисковых плугов 186

**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 201

**Степанов А.В., Катаров В.К.,
Сюнёв В.С., Колесников Г.Н.**

Моделирование влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в дорожной одежде лесотранспортной системы 217

**Шапиро В.Я., Григорьев И.В.,
Савченко С.И., Тихонов Е.А.,
Ревяко С.И., Перфильев П.Н.**

Влияние маневрирования движителя колесной лесной машины на ее проходимость в сложных геотехнических условиях 228

NATURE MANAGEMENT

Vetrov L.S.

Prospects for the implementation of forest climate projects in the Russian Federation in modern conditions 121

Gordeev R.V., Pyzhev A.I.

Carbon tax on roundwood and sawn wood exports as a measure of national industrial and climate policy 133

Konstantinov A.V., Yakusheva T.V., VyroDOVA S.A.

Scientific substantiation of indicators characterizing the achievement of adaptation goals to climate change in forests of the constituent entities of the Russian Federation 148

Yakovenko N.V., Surina E.A.

Technologies and methods of restoration of the disturbed lands of the Far North 166

TECHNOLOGIES. MACHINERY AND EQUIPMENT

**Bukhtoyarov L.D., Lysych M.N.,
Malyukov S.V.**

Modeling the interaction of soil with a combined tool - a knife roller and a pair of disc plows 186

**Bukhtoyarov L.D., Gnusov M.A.,
Lysych M.N.**

Mathematical model and methodology of express assessment crisis-deformed state of the machine frame for the care of forest crops 201

**Stepanov A.V., Katarov V.K.,
Syunев V.S., Kolesnikov G.N.**

Modeling the influence of Poisson's ratio on crack formation in the road surface of the forest transport system 217

**Shapiro V.Ya., Grigorev I.V.,
Savchenko S.I., Tikhonov E.A.,
Revyako S.I., Perfiliev P.N.**

The effect of maneuvering the propulsion of a wheeled forestry vehicle on its maneuverability in difficult geotechnical conditions 228



Влияние биостимулятора на корнеобразование черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский

Лариса В. Брындина¹ ✉, bryndinv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>,
Людмила А. Репникова¹, lyu58445295@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>
Анна Ю. Корчагина¹, nuta10011@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>
Дарья И. Живитченко¹, darzhivitchenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>
Валерий И. Посметьев¹, posmetyev@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>
Андрей Ю. Мануковский¹, mayu1964@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

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

Проблема выращивания высококачественного посадочного материала древесных пород решается путем применения биологически активных веществ. Большинство тополей, в том числе и Пирамидально-осоконовый Камышинский, размножаются черенкованием. Но слабая корневая система пирамидальных форм тополей делает их уязвимыми к засухе, ветрам и механическим повреждениям. В данной работе представлены результаты получения биостимулятора путем ферментации коллагенового сырья актиномицетом *Streptomyces fradiae* AC – 570 и оценки его влияния на формирование придаточных корней у черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский. Аминокислотный состав гидролизата коллагена определяли с применением жидкостной хроматографии на аппарате Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония). Степень гидролиза коллагенового сырья оценивали по аминному азоту, по методу Серенсена. Установлено, что оптимальными условиями получения биостимулятора являются автоклавирование измельченного сырья при гидромодуле 1:6 в течение 20 минут при давлении 0,1 МПа с последующей его ферментацией 36 ч при температуре 28-30 °С, pH 6,5 – 7,0 и концентрации культуры микроорганизма 10%. Обработка коллагенового сырья в этих условиях увеличивала степень гидролиза в 5,9 раза. При соблюдении указанных режимов биодеструкции коллагена обеспечивается высокое содержание аминокислот, что позволяет его использовать в качестве аминокислотного стимулятора растений. Содержание пролина возросло на 64,6 %, глицина – в 7,5 раза. Обработка черенков биостимулятором способствовала увеличению корневой массы более чем в 3 раза, листовой биомассы растений на 36,8 %. Общая масса черенка опытных образцов превышала контрольные варианты в 1,9 раза. Полученные данные могут использоваться для усиления корнеобразования черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский.

Ключевые слова: аминокислоты, биостимулятор, корнеобразование черенков, тополь Пирамидально-осоконовый Камышинский, коллаген

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние биостимулятора на корнеобразование черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский / Л. В. Брындина, Л. А. Репникова, А. Ю. Корчагина, Д. И. Живитченко, В. И. Посметьев, А. Ю. Мануковский // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 5–18. – Библиогр.: с. 14–17 (20 назв.). – <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/1>


Поступила 15.05.2025. Пересмотрена 10.09.2025. Принята 15.09.2025. Опубликована онлайн 25.09.2025.

Article


The effect of a biostimulator on the root formation of poplar cuttings Pyramidal-sedge Kamyshinsky

Larisa V. Bryndina¹ ✉, bryndinv@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>,

Lyudmila A. Repnikova¹, lyu58445295@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>

Anna Y. Korchagina¹, nuta10011@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>

Daria I. Zhivitchenko¹, darazhivitchenko@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>

Valerii I. Posmetev¹, posmetyev@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Andrey Yu. Manukovskiy¹, mayu1964@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

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

Abstract

The problem of growing high-quality tree planting material is solved by using biologically active substances. Most poplars, including the Pyramid-sedge Kamyshinsky, are propagated by cuttings. But the weak root system of the pyramid-shaped poplars makes them vulnerable to drought, winds and mechanical damage. This paper presents the results of obtaining a biostimulator by fermenting collagen raw materials with actinomycete *Streptomyces fradiae* AC – 570 and evaluating its effect on the formation of adventitious roots in cuttings of the Pyramidal-sedge Kamyshinsky poplar. The amino acid composition of collagen hydrolysate was determined using liquid chromatography on a Shimadzu LC-20 Prominence apparatus (Shimadzu, Japan). The degree of hydrolysis of collagen raw materials was assessed by amine nitrogen, using the Sorensen method. It was found that the optimal conditions for obtaining a biostimulator are autoclaving of crushed raw materials with a 1:6 hydromodule for 20 minutes at a pressure of 0.1 Mpa, followed by fermentation for 36 hours at a temperature of 28-30 °C, pH 6.5 – 7.0 and a concentration of culture of the microorganism of 10%. Processing of collagen raw materials under these conditions increased the degree of hydrolysis by 5.9 times. When observing these modes of collagen biodegradation, a high content of amino acids is provided, which allows it to be used as an amino acid stimulator of plants. The content of proline increased by 64.6%, and glycine by 7.5 times. Treatment of cuttings with a biostimulator increased the root mass by more than 3 times, and the leaf biomass of plants by 36.8%. The total weight of the cuttings of the prototypes exceeded the control variants by 1.9 times. The data obtained can be used to enhance the root formation of the cuttings of the Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar.

Keywords: amino acids, biostimulator, root formation of cuttings, Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar, collagen

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

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

For citation: Bryndina L.V., Repnikova L.A., Korchagina A.Y., Zhivitchenko D.I., Posmetyev V.I., Manukovsky A.Y. (2025). The effect of a biostimulator on the root formation of poplar cuttings Pyramidal-sedge Kamyshinsky. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 5-18 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/1>

Received 15.05.2025. **Revised** 12.07.2025. **Accepted** 15.05.2025. **Published online** 25.09.2025.

Введение

Здоровая и быстро растущая корневая система имеет решающее значение для продуктивности растительного сырья, поскольку пространственное размещение, плотность и структура корней определяют способность растения использовать почвенные ресурсы. У таких экономически и экологически важных древесных биоэнергетических культур, как тополь, структура корневой системы формируется в результате двух основных последовательных многоступенчатых процессов: образование корней на побегах и их разрастание за счет удлинения и ветвления. Формирование придаточных корней способствует появлению новых корневых тканей в местах, отличных от первичной корневой системы, является первым условием для успешного укоренения и роста посаженных деревьев [1].

Образование придаточных корней – это сложный биологический процесс, состоящий из нескольких фаз. Обычно они развиваются из клеток, соседних с сосудистыми тканями. На стеблевых черенках тополя зачатки придаточных корней появляются из клеток камбия и их непосредственных производных [2].

У некоторых видов *Populus* уже существуют предварительно сформированные зачатки придаточных корней в состоянии покоя. У некоторых других генотипов зачатки индуцируются в ответ на внешние раздражители или у основания черенка образуется каллус, предшествующий дифференцировке корневых зачатков [3].

Главными внутренними факторами, индуцирующими рост придаточных корней, выступают гормоны [3-7].

Некоторые наблюдения свидетельствуют о том, что образование придаточных корней является сложным и высокоорганизованным биологи-

ческим процессом, регулируемым множеством эндогенных гормонов и факторов окружающей среды. Одним из ключевых игроков в этом процессе является гормон ауксин [8]. Наиболее важными питательными веществами, участвующими в развитии первичных и боковых корней, являются азот (N) и фосфор (P) [9,10].

Видимо поэтому большинство научных работ в области изучения формирования придаточных корней у растений сосредоточены на роли фитогормонов, в основном ауксинов, и физиологических условиях черенкования. Влиянию стрессовых реакций, связанных с отделением черенка, уделяется меньше внимания, хотя отклик на повреждение, связанный с отделением черенка, является неотъемлемой частью процесса, ведущего к укоренению.

Ускорить адаптацию к стрессу можно за счет повышения содержания в черенках некоторых аминокислот, фенолов, перекиси водорода, активности антиоксидантных ферментов и др. [11]. Так Фримпонг с соавторами установлена корреляция между накоплением аминокислоты пролина и устойчивостью к водному стрессу [12]. Благоприятное влияние пролина в условиях стресса может проявляться и при поступлении пролина извне, как показано в обзоре [13].

Экзогенными источниками аминокислот могут выступать белковые гидролизаты. Но здесь следует отметить, что сырье, из которого их получают сильно влияет на аминокислотный состав. Например, гидролизаты животных белков (коллаген) содержат много пролина и глицина, а растительные (соя, водоросли) — больше глутаминовой кислоты и аргинина. Это важно, потому что разные аминокислоты по-разному влияют на растения. Животные гидролизаты обычно имеют низкомолекулярные пептиды, которые легче усваиваются растениями. Растительные могут содержать

больше полисахаридов и других веществ, которые тоже полезны, но усваиваются медленнее.

Следует также учесть, что аминокислоты из источников животного происхождения более эффективны для корнеобразования у древесных культур (тополь), так как усиливают синтез ауксинов и полиаминов, обеспечивают быструю доставку биоактивных пептидов к поврежденным тканям, что важно при черенковании, пролин и глицин из животных источников улучшают осморегуляцию и защищают клетки [14].

Растительные аминокислотные стимуляторы более эффективны для вегетативного роста и цветения. Например, аргинин и фитогормоны в растительных гидролизатах усиливают развитие побегов. При листовых подкормках отмечено, что глутаминовая кислота улучшает усвоение микроэлементов.

В связи с вышеизложенным целью исследования было повысить корнеобразование у черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский за счет стимуляции аминокислотным гидролизатом животного происхождения.

Тополь Пирамидально-осоконовый Камышинский – достаточно распространенное растение в городской среде, оно устойчиво к загрязнениям и активно очищает воздух от пыли, автомобильных выбросов [15,16]. Тополь обладает удивительной газопоглощающей способностью. За период вегетации растение пропускает 180 кг углекислого газа и выделяет 30 кг кислорода. В возрасте 25-30 лет по этому показателю оно намного продуктивнее ели, липы, клена, дуба, березы, рябины [17].

В основном тополь Пирамидально-осоконовый Камышинский размножается черенкованием, так как семенное размножение не позволяет сохранить «колону» и сеянцы часто растут с обычной раскидистой кроной.

Материалы и методы

В качестве источника аминокислот использовали гидролизат коллагена из коллагенового сырья (свиные уши). Сырье предварительно промывали дистиллированной водой, измельчали до фаршеобразного состояния, автоклавировали в колбах объемом 250 см³ в течение 20 минут при

давлении 0,1 МПа. После охлаждения до температуры 28–30 °С проводили ферментативный гидролиз культурой актиномицета *Streptomyces fradiae* AC – 570 при температуре 28–30 °С, pH 6,5 – 7,0 в шейкере-инкубаторе при n = 200 об/мин. Предварительно актиномицет *Streptomyces fradiae* AC – 570 выращивали 10 дней при температуре 28–30 °С на среде CP-1 с крахмалом состава, г/дм³: KNO₃ – 1,0; K₂HPO₄ – 0,5; NaCl – 0,5; MgSO₄ – 0,5; CaCO₃ – 1,0; FeSO₄ – 0,001; крахмал – 10; агар – 20.

Аминокислотный состав гидролизата коллагена определяли с применением жидкостной хроматографии на аппарате Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония).

Выход сухих веществ определяли по ГОСТ 31640-2012.

Степень гидролиза коллагенового сырья оценивали по аминному азоту и выражали в процентах к контрольному опыту. Аминный азот определяли по методу Серенсена. Накопление аминного азота в гидролизате свидетельствует о присутствии свободных аминокислот и пептидов.

По завершении ферментации гидролизат коллагена центрифугировали на центрифуге Liston C 2203 при 1000 об/мин, отделяли центрифугат, в котором обрабатывали черенки.

Черенки тополя готовили по ГОСТ 17267-71, выдерживали в гидролизате коллагена 24 ч при температуре 22–24 °С, затем высаживали в торф и снимали показания через 20 дней. Контролем служили черенки, замоченные в дистиллированной воде. В каждом варианте использовалось по 30 черенков.

Массу корней, листьев и черенка определяли после высушивания свежего растительного материала в термостате при температуре 105 °С до постоянной массы.

Полученные данные обрабатывали по общепринятым статистическим методам, используя программное обеспечение MS Excel (office 2010). Разница достоверно значимой считалась при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Коллаген, являясь фибриллярным белком, имеет вытянутую структуру и большую молеку-

лярную массу (300 кДа), что осложняет его разрушение. Поэтому для оптимизации процесса де- струкции коллагена важное значение имеет опре- деление условий, при которых он проводится. Од- ним из таких параметров является гидромо- дуль. Он играет ключевую роль в определении эф-

фективности реакции, повышении диффузион- ных процессов. В связи с этим был проведен экс- перимент по определению гидро модуля, обеспечи- вающего максимальное извлечение белковых со- ставляющих из коллагенового сырья. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Выход сухих веществ после автоклавирования, %

Table 1

Dry matter yield after autoclaving, %

Гидро модуль Hydraulic module	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7
Коллаген сви- ных ушей Pig Ear Collagen	22,40± 1,15	32,11 ± 2,75	40,93 ± 0,96	48,12 ± 2,15	56,21 ± 1,75	56,80 ± 3,11	57,10± 2,15

Источник: собственные экспериментальные данные| Source: own experimental data

По полученным результатам видно, что концентрация сухих веществ в гидролизате при со- отношениях 1:1 – 1:5 возрастает на 7,19 – 9,71 %. За- тем при гидро модуле 1:6 и 1:7 интенсивность гидро- лиза снижается и выход сухих веществ существенно не увеличивается. Поэтому был выбран гидромо- дуль 1:6, обеспечивающий высокую концентрацию белковых компонентов в продукте.

Другим важным условием является способ гидролиза, который влияет на качество получаемого продукта, его функциональные свойства. Наиболее перспективным считается ферментативный гидро- лиз коллагенового сырья. Этот способ разрушения коллагена, прежде всего, безопасен, не требует до- полнительной очистки конечного

продукта, в отличие от кислотного и щелоч- ного, проводимых при высоких концентрациях реа- гентов и температурах. Ферментативный гидролиз благодаря мягким условиям сохраняет биологиче- скую активность продуктов распада коллагена [18- 20].

Результаты влияния концентрации вноси- мого микроорганизма, проявляющего коллагеназ- ную активность, и продолжительности процесса на степень гидролиза коллагена представлены в таб- лике 2. Контролем выступал гидролизат коллагена, не содержащий в своем составе культуру актино- мицета *Streptomyces fradiae* AC – 570.

Таблица 2

Степень гидролиза коллагена в зависимости от концентрации культуры микроорганизма

Table 2

The degree of collagen hydrolysis depends on the concentration of the culture of the microorganism

Время гид- ролиза, ч Hydrolysis time, h	Аминный азот, мг/см ³ Amine nitrogen, mg/cm ³					
	Контроль Control	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %
0	0	0	0	0	0	0
12	1,30±0,1	3,80±0,2	5,31±0,1	5,20±0,2	5,00±0,3	4,40±0,2
24	1,37±0,1	4,62±0,1	7,28±0,1	7,30±0,2	6,35±0,1	5,20±0,2
36	1,50±0,1	5,80±0,3	8,87±0,2	7,35±0,1	6,35±0,2	5,20±0,3
48	1,50±0,1	5,82±0,1	8,87±0,1	7,35±0,2	6,35±0,1	5,20±0,2
60	1,50±0,1	5,80±0,2	8,87±0,1	7,35±0,1	6,35±0,1	5,20±0,3

Источник: собственные экспериментальные данные| Source: own experimental data

Экспериментальные данные таблицы 2 показывают, что при концентрации вносимой культуры *Streptomyces fradiae* AC – 570 10 % в течении 60 ч обеспечивается максимальная степень гидролиза коллагена, которая превышала контрольные показатели в 4,1 – 5,9 раз. Увеличение концентрации микроорганизма приводит к торможению процесса. Возможно, при слишком высокой концентрации микроорганизмов они начинают конкурировать за ресурсы, продукты распада коллагена или побочные метаболиты могут ингибировать ферментативную активность, что может привести к снижению их продуктивности.

Влияние времени ферментации на степень гидролиза коллагена показало, что при концентрациях микроорганизма 5%, 10 % и 15 % максимальные результаты были достигнуты к 36 ч гидролиза, а при концентрациях 20 % и 25 % - к 24 ч. Это объясняется тем, что микроорганизмы должны сначала вырасти и начать производить ферменты. Поэтому при низких концентрациях инокулята происходит задержка в начале гидролиза, пока культура не размножится достаточно. При высоких концентрациях начальное производство ферментов начнется быстрее.

Соблюдение указанных условий обеспечило высокий выход биостимулятора с полноценным аминокислотным составом (таблица 3).

Таблица 3

Аминокислотный состав коллагена после термической обработки в автоклаве и после ферментации

Table 3

Amino acid composition of collagen after heat treatment in an autoclave and after fermentation

Аминокислоты, % Amino acids, %	Термообработка (автоклаве) Heat treatment (autoclave)	Ферментация Fermentation
Аргинин Arginine	0,05	1,41
Лизин Lysine	0,01	0,51
Тирозин Tyrosine	0,03	0,17
Фенилаланин Phenylalanine	0,07	0,31
Гистидин Histidine	0,01	0,12
Лейцин Leucine	0,04	0,73
Изолейцин Isoleucine	0,03	0,36
Метионин Methionine	0,08	0,08
Валин Valin	0,77	0,86
Пролин Proline	0,79	1,30
Треонин Threonine	0,01	0,25
Серин Serin	0,02	0,43
Аланин Alanine	0,05	1,06
Глицин Glycine	0,32	2,38
Цистин Cystine	0,01	0,20
Глутаминовая кислота Glutamic acid	0,02	1,55
Аспарагиновая кислота Aspartic acid	0,02	1,74

Источник: собственные экспериментальные данные| Source: own experimental data

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблице 3, свидетельствует большой специфичности *Streptomyces fradiae* AC – 570 к коллагеновому сырью. Ферментированный гидролизат

характеризуется наличием всего спектра аминокислот и обеспечивает высокое их содержание в сравнении с коллагеном, подвергнутым только термиче-

ской деструкции. Результаты исследования демонстрируют повышенную биологическую ценность коллагенового гидролизата и возможность его использования в качестве аминокислотного стимулятора.

Результаты морфометрических параметров черенков, представленные на рисунке 1, демонстрируют значительные положительные изменения под воздействием аминокислотного биостимулятора,

полученного в результате ферментации коллагенового сырья с использованием культуры *Streptomyces fradiae* AC – 570. Исследования показали, что данный биостимулятор оказывает существенное влияние на биометрические показатели черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский, стимулируя активное развитие придаточных корней и обеспечивая повышение их количества в опытных образцах почти в 2,9 раза по сравнению с контролем.

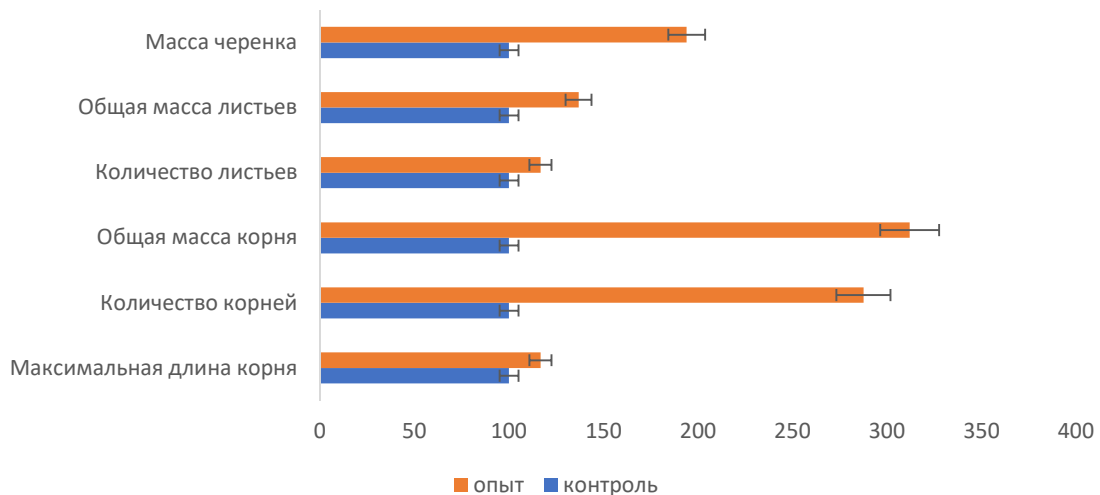


Рисунок 1. Морфометрические показатели черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский, % от контрольного образца

Figure 1. Morphometric parameters of the cuttings of the Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar, % of the control sample

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Кроме того, была зарегистрирована значительная прирост общей биомассы корневой системы — более чем в 3 раза, что свидетельствует о повышении жизнеспособности и потенциала укоренения черенков. Увеличение корневой массы напрямую влияет на способность растения лучше усваивать воду и питательные вещества из почвы, что особенно важно для дальнейшего роста и адаптации высокопродуктивных древесных культур.

На рисунке 2 визуально подтверждается различие в развитии черенков, обработанных биостимулятором, и контрольных образцов, выдержанных в воде. Черенки, подвергнутые обработке аминокислотным гидролизатом, демонстрируют не только

увеличение числа придаточных корней, но и их более развитую структуру, что указывает на улучшение морфогенеза и активизацию корнеобразования.

Помимо корневого роста, исследования выявили прирост листовой биомассы растений на 36,8%, что в значительной степени способствует усилению фотосинтеза. Повышенная листовая масса увеличивает площадь фотосинтезирующей поверхности, что ведет к большему накоплению фотосинтезирующих продуктов, а это, в свою очередь, влияет на общий рост и развитие растений. Усиление фотосинтеза активизирует транспорт и распределение ауксина — одного из важнейших гормонов, регулирующих рост корней — к местам формирования новых корней.

Фотосинтез играет ключевую роль не только в обеспечении растительных тканей необходимой энергией и ассимилятами, но и в регуляции метаболических процессов, влияющих на морфогенез корневой системы. Гены, связанные с фотосинтезом, вероятно, оказывают прямое или косвенное влияние на образование придаточных корней, что подтверждается исследованиями у черенков тополя. Это подчеркивает важность интегрированного взаимодействия физиологических процессов, где фотосинтетическая активность влияет на гормональный фон и стимулирует деление клеток, дифференцировку и рост корней.



А



Б

Рисунок 2. Черенки тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский через 20 суток:

А - замачивание в воде; Б – замачивание в биостимуляторе

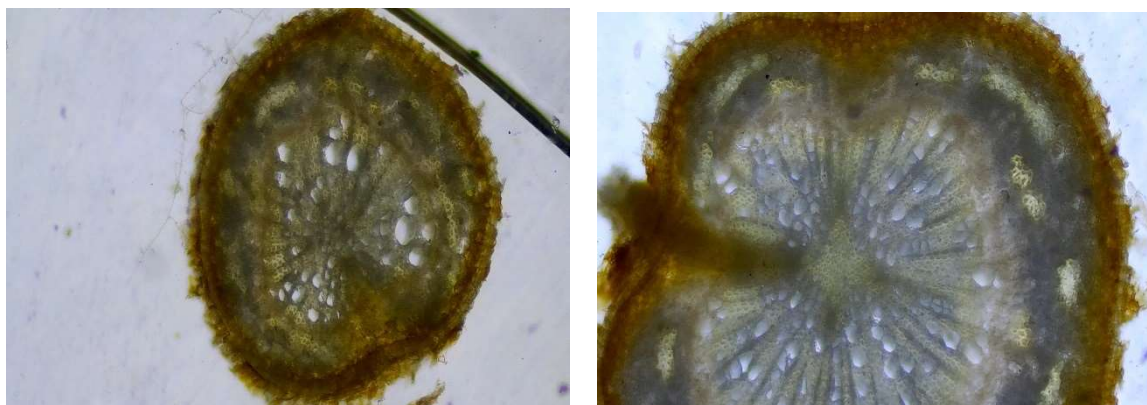
Figure 2. Cuttings of the Pyramid-sedge Kamyshinsky poplar after 20 days:

А - soaking in water; В – soaking in a biostimulator

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Образование придаточных корней у черенков тополя в основном связано с делением клеток в

сосудистых тканях и появлением корневых примордий. Формирование придаточных корней представлено на рисунке 3.



А

Б

Рисунок 3. Поперечное сечение черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский через 20 суток:

А - замачивание в воде; Б – замачивание в биостимуляторе

Figure 3. Cross section of poplar cuttings Pyramidal-sedge Kamyshinsky after 20 days:

A - soaking in water; B – soaking in a biostimulator

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

На рисунке 3 видно, что на начальной стадии формирования придаточного корня связь между проводящими элементами ксилемы стебля и корня в опытном варианте выражена ярче. Между проводящими элементами возникают сосудистые трахеиды. Благодаря деятельности камбия в области стебля и у основания придаточного корня исходные клетки ксилемы в этих органах по возрасту, расположению и строению совпадают, что обеспечивает быстрое формирование ксилемы в переходной зоне. В процессе роста придаточного корня формируется собственная вторичная ксилема корня. Между сосудами придаточного корня и стебля устанавливается тканевая связь и формируется собственная вторичная ксилема корня.

Образование придаточного корня как единого морфологического и функционального органа начинается с формирования апикальной меристемы, производные которой дифференцируются в характерные тканевые структуры, что и считается фактическим появлением корня. Развитие апикальной меристемы в стебле черенка происходит из примордия, возникающего в камбиальной зоне, которое представляет собой сферическую группу меристематических клеток. Примордия, как правило, формируются в камбиальной зоне сердцевинного луча, что послу-

жило основанием предполагать, что апикальная меристема придаточного корня развивается из изодиаметрических (лучевых) инициалей камбия.

В результате активного растяжения лучевой паренхимы в области проторизной ксилемы камбиальная зона сердцевинных лучей в опытном варианте более развита.

В сформированном придаточном корне доминируют вторичные ткани, образованные стебле-корневым камбием. Выше по оси расположены участки с первичной и вторичной ксилемой, камбием, первичной и вторичной флоэмой, первичной корой и протодермой. Вблизи апекса наблюдается типичное первичное строение: прокамбиальная стель, первичная кора и протодерма.

Закключение

В результате проведенного исследования было выявлено, что использование аминокислотного биостимулятора, полученного путем ферментативного гидролиза коллагенового сырья с применением культуры *Streptomyces fradiae* AC – 570, оказывает значительное положительное влияние на процессы корнеобразования у черенков тополя Пирамидально-осоконовый Камышинский. Биостимулятор способствует активному развитию придаточных корней, увеличивает их количество почти в три раза и значительно повышает общую биомассу корневой

системы, что свидетельствует о его высокой эффективности в усилении процессов укоренения.

Использование данного стимулятора также способствует значительному приросту листовой биомассы, что в свою очередь усиливает фотосинтетическую активность растений и ускоряет транспорт ауксина к местам формирования корней. Это важный фактор, так как ауксин является ключевым гормоном, регулирующим рост и дифференцировку корней. Повышение фотосинтетической активности способствует увеличению запасов ассимилятов, необходимых для интенсивного роста и развития как корневой системы, так и надземной части растений.

Микроскопический анализ показал улучшение связи между ксилемными элементами стебля и придаточного корня в опыте с применением биостимулятора, что обеспечивает скоординированное формирование и быстрое созревание ксилемы в переходной зоне. Это указывает на то, что аминокислотный стимулятор не только улучшает рост корней, но и способствует гармоничному развитию сосудистых тканей, необходимых для эффективного транспорта воды и питательных веществ.

Кроме того, экспериментально подтверждена высокая биологическая ценность коллагенового гидролизата как источника аминокислот с полноценным аминокислотным профилем, который содержит важные компоненты — пролин, глицин, аргинин — участвующие в осморегуляции, защите клеток от стресса и стимуляции синтеза фитогормонов. Это делает гидролизат перспективным для применения как биостимулятор в растениеводстве, особенно при размножении древесных культур, требующих быстрого и качественного укоренения.

Таким образом, применение аминокислотного стимулятора из коллагенового сырья позволяет повысить качество посадочного материала тополя Пирамидально-осокоревый Камышинский за счет активизации формирования придаточных корней и улучшения физиологического состояния черенков. Эти результаты открывают перспективы для разработки эффективных биотехнологических подходов к улучшению размножения и роста древесных культур, что имеет важное значение для экологически устойчивого городского озеленения и биоэнергетики.

Список литературы

1. Швецова Е.А., Бунькова Н.П. Оценка применения методов черенкования к выращиванию тополя пирамидального (*Populus pyramidalis*) селекции Н.А. Коновалова и тополя итальянского (*Populus italica*) в условиях Екатеринбурга // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. – С. 389-393.
2. Bannoud F., Bellini S. Adventitious rooting in populist forms: renewal and prospects. *The front: Plant Sci.* 2021;12: 668837. - doi:10.3389/fpls.2021.668837.
3. Li J., Jia H., Sun P., Zhang J., Xia Y., Hu J. et al. WUSCHELA (PtoWUSa) participates in the plasticity of Adventist roots in poplar. *Genes (Basel)*. 2020; 11: 176. - doi: 10.3390/genes11020176.
4. Ranjan A., Perrone I., Alallak S., Singh R., Rigal A., Brunoni F. et al. The molecular basis of differential adventitive root competence in poplar genotypes: *J. Express Bot.* 2022; 73: 4046-4064. - doi:10.1093/jxb/erac126.
5. Yue J., Yang H., Yang S., Wang J. (2020). TDIF regulates auxin accumulation and modulates auxin sensitivity to enhance both adventist root and lateral root formation in pololar trees: *The physiology of the tree*.2020; 40: 1534–1547. - doi:10.1093/treephys/tpaa077.
6. Yang S. , Bai J., Wang J. TDIF peptides regulate root growt by affecting auxin homeostasis and PINs expres-sion in *Arabidopsis thaliana*: *Front. Plant.* 2020; 29;251(6):109. - doi: 10.1007/s00425-020-03406-1.
7. Ahkami A.H. Systems biology of root development in *Populus*: Review and perspectives: *Plant Science.* 2023;335. doi:https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818.
8. Amir H. Akhkami. Systemic biology of root development in *Populus*: an overview and prospects Issue. *Plant Sci.* 2023; 335: 111818. - https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818.

9. Zhang M., Zhou H., Xiang H. et al. Characterization and analysis of genetic differences in the development of adventitious roots of *Populus* germplasm resources: *Plant Mol Biol.* 2024; 114, 9. - <https://doi.org/10.1007/s11103-024-01418-z>.
10. Arya, A.; Husen, A. The role of various auxins in the formation of adventitive roots. in the ecological, physiological and chemical control of accidental rooting of cuttings; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 2022; pp. 213-238. [Google Academy].
11. Ali M., Jeddi K., Attia M.S., Elsayed S.M., Yusuf M., Osman M.S., Soliman M.H., Hessini K. Wuxal amino (Bio stimulant) improved growth and physiological performance of tomato plants under salinity stress through adaptive mechanisms and antioxidant potential: *Saudi Journal of Biological Sciences.* 2021; 28 (6):3204-3213. - DOI:10.1186/s40529-022-00345-w.
12. Frimpong F., Windt C.W., Dusschoten D., Naz A.A., Frei M., Fiorani F. A Wild Allele of *Pyrroline-5-Carboxylate Synthase1* Leads to Proline Accumulation in Spikes and Leaves of Barley Contributing to Improved Performance Under Reduced Water Availability: *Front. Plant Sci.* 2021;12: 633448. - DOI: 10.3389/fpls.2021.633448.
13. El Moukhtari A., Cabassa-Hourton C., Farissi M., Savouré A. How Does Proline Treatment Promote Salt Stress Tolerance During Crop Plant Development? *Front. Plant Sci.* 2020; 11:1127. - DOI: 10.3389/fpls.2020.01127.
14. Buffagni V., Vurro F., Janni M., Gulli M., Keller A.A., Marmioli N. Shaping Durum Wheat for the Future: Gene Expression Analyses and Metabolites Profiling Support the Contribution of BCAT Genes to Drought Stress Response: *Front. Plant Sci.* 2020; 11:891. - DOI: 10.3389/fpls.2020.00891.
15. Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Лаур Н.В. Некоторые результаты испытания тополей в Центральной лесостепи// Лесохозяйственная информация. — 2023. — № 1. — С. 111–120. — DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.09.
16. Учарова Ю. Н., Зюбровская А. В., Христич В.В. Выращивание тополя пирамидального в зеленом строительстве// Молодой ученый. — 2017. — № 5 (139). — С. 121-123. — URL: <https://moluch.ru/archive/139/39206/>.
17. Абрамов А. Тополя проклинают, а зря: деревьям просят дать второй шанс в городах. - 30 июня 2022: Сайт: Комсомольская правда. – URL: <https://www.kp.ru/daily/27412/4611038/>.
18. Gharehbeglou P., Sarabandi K., Akbarbaglu Z. Insights into enzymatic hydrolysis: Exploring effects on antioxidant and functional properties of bioactive peptides from *Chlorella* proteins. *Journal of Agriculture and Food Research.* 2024;16: 101129. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101129>.
19. Mohanty U., Majumdar R.K., Mohanty B., Mehta N.K., Parhi J. Influence of the extent of enzymatic hydrolysis on the functional properties of protein hydrolysates from visceral waste of *Labeo rohita*: *Food Science Technology.* 2021;58(11):4349–4358. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04915-3>.
20. Bai L., Tian X., Wang Y., Zhang K., Guo J., Ma C. et al. Antioxidant activity during in vitro gastrointestinal digestion and the mode of action with tannins of cowhide-derived collagen hydrolysates: The effects of molecular weight: *Food Bioscience.* 2023; 53:102773.

References

1. Shvetsova Ye.A., Bunkova N.P. *Otsenka primeneniya metodov cherenkovaniya k virashchivaniyu topolya piramidalnogo (Populus pyramidalis) seleksii N.A. Konovalova i topolya ital'yanskogo (Populus italica) v usloviyakh Yekaterinburga* [Evaluation of the application of cuttings to the cultivation of N.A. Konovalov's pyramidal poplar (*Populus pyramidalis*) and Italian poplar (*Populus italica*) in Yekaterinburg]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii. – Yekaterinburg: UGLTU = Scientific creativity of youth is dedicated to the Russian forest complex. – Yekaterinburg: UGLTU. 2023; 389-393. (In Russ.).
2. Bannoud F., Bellini S. *Adventitious rooting in populist forms: renewal and prospects. The front:* *Plant Sci.* 2021;12: 668837. DOI:10.3389/fpls.2021.668837.
3. Li J., Jia H., Sun P., Zhang J., Xia Y., Hu J. et al. *WUSCHELA (PtoWUSa) participates in the plasticity of Adventist roots in poplar. Genes (Basel).* 2020; 11: 176. DOI: 10.3390/genes11020176.

4. Ranjan A., Perrone I., Alallak S., Singh R., Rigal A., Brunoni F. et al. *The molecular basis of differential adventitious root competence in poplar genotypes*: J. Express Bot. 2022; 73; 4046–4064. DOI:10.1093/jxb/erac126.
5. Yue J., Yang H., Yang S., Wang J. *TDIF regulates auxin accumulation and modulates auxin sensitivity to enhance both adventitious root and lateral root formation in poplar trees*: The physiology of the tree.2020; 40; 1534–1547. DOI:10.1093/treephys/tpaa077.
6. Yang S., Bai J., Wang J. *TDIF peptides regulate root growth by affecting auxin homeostasis and PINs expression in Arabidopsis thaliana*: Front. Plant. 2020; 29;251(6):109. DOI: 10.1007/s00425-020-03406-1.
7. Ahkami A.H. *Systems biology of root development in Populus: Review and perspectives*: Plant Science. 2023;335. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818>.
8. Amir H. Akhkami. *Systemic biology of root development in Populus: an overview and prospects Issue*. Plant Sci. 2023; 335: 111818.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111818>.
9. Zhang M., Zhou H., Xiang H. et al. *Characterization and analysis of genetic differences in the development of adventitious roots of Populus germplasm resources*: Plant Mol Biol. 2024; 114, 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-024-01418-z>.
10. Arya, A.; Husen, A. *The role of various auxins in the formation of adventitious roots. in the ecological, physiological and chemical control of accidental rooting of cuttings*; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 2022; pp. 213–238. [Google Academy].
11. Ali M., Jeddi K., Attia M.S., Elsayed S.M., Yusuf M., Osman M.S., Soliman M.H., Hessini K. *Wuxal amino (Bio stimulant) improved growth and physiological performance of tomato plants under salinity stress through adaptive mechanisms and antioxidant potential*: Saudi Journal of Biological Sciences. 2021; 28 (6):3204–3213. DOI:10.1186/s40529-022-00345-w.
12. Frimpong F., Windt C.W., Dusschoten D., Naz A.A., Frei M., Fiorani F. *A Wild Allele of Pyrroline-5-Carboxylate Synthase1 Leads to Proline Accumulation in Spikes and Leaves of Barley Contributing to Improved Performance Under Reduced Water Availability*:Front. Plant Sci. 2021;12: 633448. DOI: 10.3389/fpls.2021.633448.
13. El Moukhtari A., Cabassa-Hourton C., Farissi M., Saviouré A. *How Does Proline Treatment Promote Salt Stress Tolerance During Crop Plant Development?* Front. Plant Sci. 2020; 11:1127. DOI: 10.3389/fpls.2020.01127.
14. Buffagni V., Vurro F., Janni M., Gulli M., Keller A.A., Marmioli N. *Shaping Durum Wheat for the Future: Gene Expression Analyses and Metabolites Profiling Support the Contribution of BCAT Genes to Drought Stress Response*: Front. Plant Sci. 2020; 11:891. DOI: 10.3389/fpls.2020.00891.
15. Czarev A.P., Czareva R.P., Czarev V.A., Laur N.V. *Nekotorye rezultaty ispytaniya topolej v Centralnoj lesostepi*. [Some results of testing poplars in the Central forest-steppe]. Lesoxozyajstvennaya informaciya = Forestry information. 2023; 1:111–120. (In Russ.).DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.09.
16. Ucharova Yu. N., Zyubrovskaya A. V., Xristich V.V. *Vyrashhivanie topolya piramidalnogo v zelenom stroitelstve* [Cultivation of pyramidal poplar in green construction]. Molodoj uchenyj = Young scientist. 2017; 5 (139): 121–123. (In Russ.).URL: <https://moluch.ru/archive/139/39206/>.
17. Abramov A. *Topolya proklinayut, a zrya: Derevyam prosyat dat vtoroj shans v gorodax* [Poplars are cursed, but in vain: Trees are asked to be given a second chance in cities] - 30 iyunya 2022: Sajt: Komsomolskaya Pravda = June 30, 2022: Website: Komsomolskaya Pravda. (In Russ.).URL: <https://www.kp.ru/daily/27412/4611038/>.
18. Gharehbaglou P., Sarabandi K., Akbarbaglu Z. *Insights into enzymatic hydrolysis: Exploring effects on antioxidant and functional properties of bioactive peptides from Chlorella proteins*: Journal of Agriculture and Food Research. 2024;16: 101129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101129>.
19. Mohanty U., Majumdar R.K., Mohanty B., Mehta N.K., Parhi J. *Influence of the extent of enzymatic hydrolysis on the functional properties of protein hydrolysates from visceral waste of Labeo rohita*: Food Science Technology. 2021;58(11):4349–4358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04915-3>.

20. Bai L., Tian X., Wang Y., Zhang K., Guo J., Ma C. et al. *Antioxidant activity during in vitro gastrointestinal digestion and the mode of action with tannins of cowhide-derived collagen hydrolysates: The effects of molecular weight*: Food Bioscience. 2023; 53:102773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102773>.

Сведения об авторах

✉ *Брындина Лариса Васильевна* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Репникова Людмила Александровна – аспирант лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>, e-mail: lyu58445295@yandex.ru.

Корчагина Анна Юрьевна – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>, e-mail: nuta10011@yandex.ru.

Живитченко Дарья Ивановна – аспирант лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>, e-mail: darazhivitchenko@gmail.com.

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Мануковский Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>, e-mail: mayu1964@mail.ru

Information about the authors

✉ *Larisa V. Bryndina* – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Lyudmila A. Repnikova - Post graduate student at of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6122-0412>, e-mail: lyu58445295@yandex.ru.

Anna Yu. Korchagina - Cand. Sci. (Technic.), junior researcher at the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>, e-mail: nuta10011@yandex.ru.

Darya I. Zhivitchenko - Post graduate student at of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4038-7611>, e-mail: darazhivitchenko@gmail.com.

Valerii I. Posmetev – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Andrey Yu. Manukovskiy - Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Professor 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/0000-0003-4289-6581>, e-mail: mayu1964@mail.ru.

✉ – Для контактов /Corresponding author



Взаимосвязь биометрических показателей шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco в условиях Центрально-Чернозёмного региона

Светлана И. Дегтярева¹ ✉, degtjarewa-lana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3825-1158>

Анатолий Н. Одинцов², sort3@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7205-7688>

Валентина Д. Дорофеева¹, ekzo40@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3624-6304>

Валентина Ф. Шипилова², lesopark.vrn@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0004-2069-1638>

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

²ФГБУ «ВНИИЛГИСбиотех», ул. Ломоносова, 105, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Видовой состав лесов России ограничен и представлен несколькими хвойными лесобразующими видами. Один из путей увеличения биоразнообразия лесов – использование быстрорастущих высокопродуктивных интродуцентов, в частности *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Опыт интродукции вида свидетельствует о возможности её культивирования во многих лесорастительных зонах. Работа проведена с целью изучения генеративной сферы по двум областям Центрально-Чернозёмного региона (Воронежская и Курская). Комплексное интродукционное изучение вида начали с установления взаимосвязи биометрических показателей шишек и семян. Конечная цель работы заключается в модификации традиционных методик по размножению, разработке подробных рекомендаций по введению *P. menziesii* в различные типы лесных насаждений ЦЧР в качестве сопутствующей породы. Количество экземпляров *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, с которых осуществлялся сбор шишек составил от 8 до 10, возраст деревьев – примерно от 30-40 лет (Курская область) до 65 лет в Воронежской области, количество шишек – 100 (из каждого пункта сбора). При анализе показателей размеров шишек и семян рассчитывали коэффициент вариации (CV) между партиями семян и шишек, коэффициент корреляции Пирсона (r), использовали регрессионный анализ (коэффициент детерминации R^2). Были выявлены прочные положительные связи между длиной шишек и количеством полнозернистых семян $r = 0,923$, и сильно отрицательная между длиной шишки и количеством пустых семян $r = -0,750$. Корреляционная зависимость между шириной шишек и количеством полнозернистых семян отличается чуть меньше теснотой связи $r = 0,833$, между шириной шишек и количеством пустых семян $r = -0,651$. Коэффициент вариации по всем трём пунктам сбора достигает высоких значений вариабельности по длине шишек 37,0 %, ширине шишек – 20,3 %. Изменчивость длины семени с крылом (18,4 %) и ширины семени (6,1 %) соответствуют средней и низкой вариабельности. Биометрические параметры шишек и семян также аппроксимируются полиномиальной функцией второго порядка.

Ключевые слова: *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, интродуцент, генеративная сфера, биометрические показатели шишек и семян, полнозернистые и пустые семена

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: Дегтярева, С. И. Взаимосвязь биометрических показателей шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco в условиях Центрально-Чернозёмного региона / С. И. Дегтярева, А. Н.Одинцов, В. Д. Дорофеева, В. Ф. Шипилова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 19–36. – Библиогр.: с. 32–35 (31 назв.). – DOI:<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/2>.

Поступила 26.05.2025. **Пересмотрена** 15.07.2025. **Принята** 15.09.2025. **Опубликована онлайн** 25.09.2025.

Article

Relationship between the biometric indicators of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco cones and seeds in the Central Chernozem Region

Svetlana I. Degtyareva¹✉, degtjarewa-lana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3825-1158>

Anatoly N.Odintsov², sort3@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7205-7688>

Valentina D. Dorofeeva¹, ekzo40@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3624-6304>

Valentina F. Shipilova², lesopark.vrn@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2069-1638>

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

²All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Lomonosov street, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

The species composition of Russia's forests is quite limited and is represented by several coniferous forest-forming species. One of the ways to increase the biodiversity of forests is to use fast-growing, highly productive introductions, such as *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. The experience of introducing this species indicates that it can be cultivated in many forest zones. This study was conducted to investigate the generative sphere in two regions of the Central Black Earth Region (Voronezh and Kursk). The complex introduction study of the species began with the establishment of the relationship between the biometric indicators of cones and seeds. The purpose of the work is to modify traditional methods of propagation and develop detailed recommendations for introducing *P. menziesii* into various types of forest plantations in the Central Black Earth Region as a companion species. The number of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco specimens from which the cones were collected ranged from 8 to 10, and the age of the trees was approximately 30-40 years (Kursk Region) to 65 years (Voronezh Region), with a total of 100 cones collected from each location. When analyzing the size of cones and seeds, we calculated the coefficient of variation (CV) between batches of seeds and cones, the Pearson correlation coefficient (r), and used regression analysis (the determination coefficient R^2). There were strong positive relationships between the length of cones and the number of full-grain seeds $r = 0.923$, and a strongly negative relationship between the length of cones and the number of empty seeds $r = -0.750$. The correlation between the width of the cones and the number of full-grain seeds is slightly less than $r = 0.833$, and the correlation between the width of the cones and the number of empty seeds is $r = -0.651$. The coefficient of variation for all three collection points reaches high values of variability in the length of cones - 37.0 %, the width of cones – 20.3 %. The variability of seed length with a wing (18.4%) and seed width (6.1 %) correspond to medium and low variability. The biometric parameters of cones and seeds are also approximated by a second-order polynomial function.

Keywords: *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, an introduced species, generative sphere, biometric indicators of cones and seeds, full-grained and empty seeds

Funding: this research received no external funding.

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

For citation: Degtyareva S. I., Odintsov A. N., Dorofeeva V. D., Shipilova V. F. (2025). Relationship between the biometric indicators of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco cones and seeds in the Central Chernozem Region. Forestry Engineering journal. Vol. 15, No. 3 (59), pp. 19-36 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/2>.

Received 26.05.2025. **Revised** 15.07.2025. **Accepted** 15.09.2025. **Published online** 25.09.2025.

Введение

Леса поддерживают большую часть мирового биоразнообразия на суше и обеспечивают средствами к существованию миллиарды людей, но эти и другие преимущества находятся под угрозой из-за происходящих глобальных изменений [1].

Одни авторы, Thomas Knoke et al. (2023) видят данные угрозы в продолжающейся вырубке лесов, которая по-прежнему преобладает во всем мире [2].

Конечно же, перспективы лесного хозяйства – это непрерывное возобновление растительного покрова и повышение производительности насаждений.

Daniel Barker-Rothschild et al. (2023) [3] и Ariane Mirabel (2023) [4] отмечают ускоряющееся изменение лесных экосистем из-за частых и сильным засух, что приведёт, по их мнению, к высыханию атмосферы в ближайшие десятилетия и ухудшит сохранение углерода. Продуктивность лесных экосистем понизится, изменятся физические и химические свойства биомассы.

В связи с этим, всё большую актуальность приобретает вопрос о том, как справляться с такими нарушениями в управлении экосистемами, включающие лесное хозяйство.

C.Montagne-Huck and M. Brunette (2018) предлагают непрерывно исследовать различными способами и тест-объектами потенциал лесных экосистем, и избегать глобальной смены доминирующей растительности [5].

Стремясь смягчить последствия изменения климата, лесоводы в Центральной Европе, как указывают Hans Pretzsch et al. (2023) [6], Elisabeth Ritzer et al. (2023) [7], Jonas Glatthorn et al. (2023) [8] всё чаще обращаются к хвойным породам, которые дают более высокие показатели устойчивости лесных экосистем и лучше адаптированы к прогнозируемым будущим климатическим условиям.

Недавние исследования Alexandra R. Lalora (2023) et al. сосредоточены на том, как засуха и аномальная

жара могут влиять на смертность определенных отдельных видов деревьев, учитывая одновременные изменения в климате, экогидрологии и физиологии [9]. Низкогорные виды хвойников, произрастающие в более теплых условиях окружающей среды, погибли раньше (*Pinus sylvestris* L. через 10 недель, *Pinus edulis* Engelm. за 14 недель), чем виды, произрастающие на больших высотах в более прохладных условиях окружающей среды (*Picea engelmannii* Parry ex Engelm. и *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco через 19 недель, и *Pinus flexilis* E.James в течение 30 недель). При воздействии аномальной жары в сочетании с засухой смертность значительно возросла только у видов, обитающих в более прохладных условиях (*Pinus flexilis* E.James: 2,7 недели; *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco: 2 недели).

При проведении интродукции определенного вида нельзя забывать о трёх первоочередных задачах. Во-первых: выживаемость вводимых пород демонстрирует как правило, закономерность «подъем-падение» и в зависимости от типа насаждения нужно принять решающее значение для долгосрочной устойчивости лесов. Во-вторых, по версии Joseph L. Crockett (2023) : на границе возможного потенциального ареала виды могут столкнуться с климатическими условиями, повышающими вероятность гибели на стадии всходов. В-третьих: многие из этих видов могут проявлять инвазивные свойства и негативно влиять на местные экосистемы [10]. Как предупреждает Aurore Fanal et al. (2023), крайне важно выявлять потенциально инвазивные виды до того, как они будут широко распространены [11]. Применение принципов отбора материалов в 2023 г. позволило группам независимых друг от друга исследователей Christian Huber et al. [12], Benjamin Gang [13], выявить восемь возможных альтернативных видов деревьев (два лиственных и шесть хвойных), которые потенциально предотвращают

экономические потери в лесах Центральной Европы. В число таких «правильных» пород входит *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Введение *P.menziesii* в породный состав лесов различных ботанико-географических зон – это одна из предложенных стратегий, позволяющая избежать негативных последствий для управления лесным хозяйством, на это также указывают труды Benjamin N.E.Plaga et al. [14]. Но, применение данной стратегии потребует комплексного подхода, сочетающего в себе как лесоводческие, так биолого-экологические и технологические аспекты.

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco вечнозелёная древесная порода, образующая темнохвойные леса североамериканского побережья Тихого океана (Северная Америка считается её родиной). Далее ареал простирается от Мексики до западных границ Канады [15]. Вид успешно культивируется как высокопродуктивный и декоративный интродуцент в лесных культурах на территории: Великобритании, в Нидерландах, Бельгии, Дании, Франции, Австрии, Швейцарии, Италии, Чехии, Румынии, Венгрии, Болгарии, Польше, Литве, Латвии, Эстонии. Помимо европейских стран, лесоводственный интерес к данной породе проявляют в Аргентине, Австралии и Новой Зеландии. Причём в Австралии, исследованиями было показано, что опад улучшает химические свойства почвы лучше, чем аборигенные эвкалиптовые насаждения.

Такие характеристики, как зимостойкость, нетребовательность к питательным веществам почвы, газо- и дымоустойчивость и устойчивость к болезням и вредителям, высокие бальнеологические свойства позволяют использовать *P.menziesii* в том числе и для озеленения [16, 17].

Подытоживая мировой обзор литературы: *P. menziesii* оценивается как перспективный, потенциально способный к адаптации при изменении климата вид, широко используемый для создания древостоев, в первую очередь смешанных [18].

В России *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco культивируется с 1840-х гг. Существуют посадки псевдотсуги в Москве и Московской области, Йошкар-Оле, Казани, Башкирии, а так же отдельные экземпляры в Ботанических садах и дендрариях Урала и Сибири [19], Беларуси [20], Украине [21]. Редко

встречается в садах и парках Кавказа, Крыма. Особо хорошо растет в зоне влажных субтропиков (Сочи, Адлер, Сухуми) [22].

В лесных культурах РФ *P.menziesii* представлена деревьями первой величины, достигающими 40-50 м, в диаметре 120-180 см (на родине соответственно 90-140 м и 240-500 см). Живёт до 700 и более лет (1000-1400 лет).

Вид произрастает на рыхлых плодородных супесчаных и лёгких суглинистых почвах. Как лесная, быстрорастущая и довольно теневыносливая порода лучше растёт в смеси с другими лесообразующими видами (сосна обыкновенная, ель европейская, виды дуб, бук, граб, ясень, ольха), часто обгоняя их по росту.

На территории постсоветского пространства Торчик В.И. (2013) в своей работе обобщил мировой и отечественный опыт выращивания *P. menziesii* вне естественного ареала. В его монографии представлены экспериментальные данные по росту, развитию, плодоношению, устойчивости и продуктивности вида в условиях Беларуси [20].

Учитывая всё вышеизложенное, понимаем, что необходимо стремиться к устойчивости лесных экосистем с постепенным введением новых устойчивых и апробированных видов.

Видовой состав лесов России достаточно ограничен и представлен несколькими хвойными лесообразующими видами. Один из путей увеличения биоразнообразия лесов – использование при лесовыращивании быстрорастущих высокопродуктивных интродуцентов для создания устойчивых насаждений искусственного происхождения, в частности *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Эта ценная порода по своим таксационным показателям нередко превосходит местные виды хвойных пород.

Глобальную проблему по введению вида в лесные экосистемы видим в тщательном изучении эколого-биологических особенностей, в частности размножения в новых условиях ареала и разработке комплексной технологии выращивания посадочного материала.

Для успешной интродукции *P.menziesii* в условиях лесостепной и степной зон необходимо: выявить местные насаждения, изучить эколого-биологиче-

ские особенности вида (особенно в условиях усиливающейся аридизации климата в Центральном Черноземье), проследить взаимосвязь параметров шишек и семян от экологических и орографических факторов, выбрать оптимальные методики выявления полноценных семян, установить характеристики посевных качеств семян.

Ранее уже обосновывали перспективность нескольких разновидностей р. *Pseudotsuga* в Центральном Черноземье и имеем первоначальный опыт по размножению [23].

На данном этапе своей работы предлагаем гипотезу о прямой взаимосвязи параметров шишек и семян, что возможно впоследствии окажет влияние на всхожесть семян и качество сеянцев, и, в конечном итоге устойчивость вида в смешанных насаждениях, в первую очередь на территории Центрального Черноземья.

Цель работы – изучить взаимосвязь биометрических показателей шишек с семенами *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. двух регионов Центрально-Чернозёмного региона (ЦЧР). В перспективе полученные данные будут являться основой по комплексному интродукционному введению изучаемого вида в различные типы лесных насаждений в качестве сопутствующей породы.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объект исследования – экземпляры псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.), семейства Сосновые (Pinaceae), произрастающие на территории Воронежской и Курской области.

Исследования проводились в дендрарии ФГБОУ ВО ВГЛТУ (далее дендрарий), Семилукском питомнике (Воронежская область, далее питомник) и одиночные посадки псевдотсуги Мензиса в Мантуровском и Кшенском районах Курской области (далее Курская область). Выбранные территории относятся к лесостепной и степной зонам, природно-климатические условия которых резко отличаются от природного ареала породы. Изучение существующих насаждений *P. menziesii* послужат источником местного генетического материала и создания объектов постоянной лесосеменной базы в будущем.

Предмет исследования – биометрические показатели шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco., их взаимосвязь.

Сбор данных

На перспективность интродукции *P. menziesii* в Воронежской области указывают результаты генетических исследований, проводимых Л.С. Мурая, А.К. Буториной и Е.М. Дудецкой (1976). Исследователями было выяснено, что в условиях лесостепной и степной зоны более широкое использование вида будет благополучным, так как по числу хромосом *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. занимает особое место. Число гаплоидных хромосом 13 (диплоидное 26). Кариологический анализ трех типов популяций северо-американского происхождения, проведенный в Воронеже показал наличие диплоидного числа хромосом (26) и наличие у отдельных типов характерной вторичной перетяжки в прицентромерном районе малого плеча в 10-й паре, у других типов – в 5-ой паре. Учёные установили также регулярное поведение хромосом в мейозе, что, по их мнению, говорит об устойчивости вида к смене экологических факторов [24].

Всестороннее изучение растений и конкретно способы и технологии выращивания посадочного материала невозможно без изучения особенностей развития генеративной сферы [25, 26]. Мы находимся на первом этапе интродукционных исследований – биометрические показатели. В планах у нас совершенствование методики семенного размножения, далее более детальное изучение произрастания сеянцев *P. menziesii* в теплице и (или) грунте и поэтапное введение в модельные лесные участки, с целью изучения устойчивости к аридизации климата и резкой смене температурного режима.

В пределах каждой пункта Воронежской и Курской областей проведен сбор материала. Во временных промежутках – 4 неделя августа и 1 неделя сентября в 2024 г. мы произвели сбор шишек (для детальных замеров отобрали по 100 шишек с каждого из 3 выше обозначенных пунктов) со средней части кроны. Возраст *P. menziesii* в дендрарии и питомнике составляет 65 лет, в Курской области примерно 30-40 лет. Для исследования использовали выборку, представленную смесью шишек от 8 (Курская область)

до 10 деревьев (в питомнике и дендрарии). Диаметр ствола 55-60 см; высота 23-25 м.

На 3-4 неделе сентября этого же года произвели замеры шишек, семян, взвешивание семян и шишек. Длину и ширину (диаметр) шишек измеряли штангенциркулем в двух взаимно перпендикулярных направлениях в наиболее широкой части. При работе с семенами использовали межгосударственный стандарт, который распространяется на семена деревьев и кустарников, предназначенные для посева, и устанавливает метод определения их всхожести ГОСТ-13056.6-97. После сбора семена из разных пунктов сбора хранили в одинаковых условиях: семена были помещены в бумажные пакеты в холодильнике на верхней полке (температура +4-5°C). Первую партию семян запустили в эксперимент по лабораторному проращиванию семян – 01 апреля 2025 г., вторую партию продолжаем хранить ещё один год и приступим к эксперименту ровно через год – 01 апреля 2026 г. Но, в данной работе излагать результаты анализа лабораторной всхожести этого года не планировали.

Отделение пустых семян от полнозернистых методом сортировки семян в различных жидкостях (вода, раствор 4 % поваренной соли и 96 % этиловый спирт и т.д.) является простым и распространенным способом повышения класса качества семян, позволяющим снизить их расход при высеве.

Данную процедуру в данном эксперименте проводили с целью получения информации о количественных и качественных характеристиках семян. В качестве жидкости использовали дистиллированную воду. Полнозернистость семян определяли опираясь на методические рекомендации ГОСТ 1356.8-97. Но, поскольку информация о конкретном времени замачивания изучаемой породы в стандарте отсутствует, то опираясь на работу Тупика П.В (2008) семена замачивались на 18 часов при температуре +18-20 °C [27]. Через 35 минут мы наблюдали постепенное перемещение семян на дно лабораторной посуды. Но, эксперимент по флотации не стали прерывать, отдавая себе отчёт, что это вызвано набуханием семян. В ходе эксперимента отмечалось, что многие семена, всплывшие в начале опыта, с течением времени опустились на дно.

Анализ данных

Математическую обработку полученных данных осуществляли с использованием стандартных статистических характеристик (программа Microsoft Excel, версия 13). При анализе показателей размеров шишек и семян использовали метод вариационной статистики и качественную оценку тесноты связи, конкретно рассчитывали коэффициент вариации (CV) между партиями семян и шишек, коэффициент корреляции Пирсона (r) соответственно. Использовали регрессионный анализ (коэффициент детерминации R^2 , который характеризует долю объяснённой вариации в общей) для отражения реальной взаимосвязи между изучаемыми показателями.

Результаты

В данной работе уделили значительное внимание биометрической характеристике шишек семян из двух областей ЦЧР. Предположили, что имеется возможная взаимосвязь между размерами шишек и показателями семян *P. menziesii*. Что в свою очередь окажет влияние на два основных этапа развития семян – энергию прорастания и абсолютную всхожесть.

В камеральных условиях весь собранный урожай шишек из каждого пункта сбора подвергся тщательному анализу: определяли массу шишек в абсолютно сухом состоянии путём взвешивания на электронных весах, вычислялись абсолютные и средние показатели длины, ширины, массы шишек, содержание в них полнозернистых и пустых семян; размеры семян, массу семян в одной шишке и 1000 штук семян. Количество и размеры семенных чешуй не учитывали.

Не ставя своей задачей изучение особенностей сроков прохождения феноритмов в генеративной сфере, мы всё же обратили внимание на тот факт, что одни и те же фенофазы в дендрарии сдвинуты примерно на 10-12 дней раньше.

Из каждого пункта сбора в зависимости от показателей размеров шишек и семян мы получили условные пять партий, с разным количеством шишек (табл. 1.). В таблице 1 мы также указали объединённую выборку и по семенам.

При опылении и оплодотворении хвойных пород большая часть пыльцы оседает на женские стробилы верхней части кроны. И, большая часть солнечной энергии аккумулируется здесь же. Неоспоримый факт – более крупные шишки развиваются в верхней

части кроны, средние по размеру и мелкие – середина и ниже середины соответственно.

Обращает внимание тот факт, что наиболее крупные размеры имеют самые большие партии (в количестве 40-45 штук) шишек.

Размеры шишек в Курской области относительно малы в отличие от двух других пунктов: длина от 4,70 см до 5,60 см (в среднем 4,66 см), ширина 3,02-3,08 см (в среднем 3,04 см).

В питомнике зафиксированы следующие показатели: длина от 5,10 см до 7,92 см, ширина 4,36 до 4,86 см. Выше и средние значения параметров шишек 6,04х4,81 см.

В дендрарии линейные размеры шишек от 5,58х3,56 см до 6,50х3,80 см, но в среднем на выборку из 100 шишек составляет 6,06х3,71 см.

Из таблицы 1 видно, что по средним значениям схожи размеры шишек деревьев, произрастающих в

питомнике и дендрарии (данные приведены с указанием стандартной ошибки).

Несмотря на незначительную разницу в размерах шишек между тремя выбранными пунктами, в целом показатели попадают в диапазон размеров шишек экземпляров, произрастающих в С.Америке – 3-18 (5-10)х2-4(2-3) см.

Это первая обнадеживающая характеристика генеративного органа *P. menziesii*, которая свидетельствует о хорошем адаптационном потенциале породы в ЦЧР.

А.В.Семенютина и Д.А. Сапронова (2014) приводят для условий Волгоградской области для нескольких разновидностей *P.menziesii* чуть меньшие усредненные размеры шишек от 3,7±0,18 см (для мелких) и 6,4±0,32 см для крупных [28].

Таблица 1

Характеристика шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Table 1

Characteristics of cones and seeds *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Пункт сбора Collection point	Партии шишек, штук Parties cones, pieces	Длина шишки, см Length of the cone, cm	Ширина шишки, см Width cones, cm	Длина семени с крылом, см The length of the seed with a wing, cm	Ширина семени, см Seed width, cm
Курская область Kursk region	10	5,20±0,06	3,02±0,04	0,82±0,06	0,32±0,05
	15	5,40±0,04	3,05±0,03	0,76±0,03	0,32±0,03
	45	5,60±0,02	3,03±0,02	0,69±0,02	0,32±0,02
	15	4,70±0,03	3,08±0,03	0,65±0,03	0,32±0,03
	15	5,40±0,03	3,04±0,03	0,80±0,03	0,32±0,03
Воронежская область, Семилюкский питомник Voronezh Region, Semiluksky Nursery	5	5,59±0,05	4,84±0,05	1,01±0,04	0,34±0,06
	5	5,40±0,05	4,85±0,03	0,80±0,04	0,34±0,05
	40	6,21±0,02	4,72±0,02	1,30±0,02	0,36±0,02
	5	5,10±0,06	4,80±0,06	0,72±0,05	0,36±0,03
	45	7,92±0,02	4,86±0,01	1,39±0,02	0,44±0,02
Воронежская область, дендрарий Voronezh Region, Arboretum	14	6,34±0,02	3,91±0,03	1,37±0,05	0,34±0,03
	3	5,80±0,05	3,53±0,03	1,36±0,06	0,34±0,05
	3	5,58±0,05	3,56±0,03	0,90±0,05	0,32±0,05
	40	6,10±0,02	3,73±0,02	1,22±0,02	0,34±0,02
	40	6,50±0,02	3,80±0,02	0,92±0,02	0,34±0,02

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Взвешивание шишек в абсолютно сухом состоянии показало небольшую разницу в 2,26-2,37 г (в среднем на 100 шишек) между пунктами сбора (Курская область – 8,84 г; Воронежская область 11,10-11,21 г).

Исследуя содержание количества семян в шишках *P. menziesii*, необходимо отметить, что формирование семян происходит в течение одного года (у коренной породы *Pinus sylvestris* L. – двух лет), начиная с опыления и заканчивая созревaniem.

Как показывают работы Аникеева Д.Р. и др. содержание семян в шишках обусловлено влиянием многих факторов: географического положения, высоты над уровнем моря, условий местопроизрастания, возраста вида, состояния погоды в вегетационные периоды формирования урожая и т.д. [29]. Нельзя сбрасывать со счетов и увеличивающееся влияние техногенного загрязнения.

Имея опыт работы с семенным размножением других хвойных пород, констатируем, что содержание семян в шишках варьирует даже при равных размерах последних в сборных партиях [30]. Данная взаимосвязь – это прежде всего отражение адаптации растений к почвенно-климатическим условиям произрастания. И, под действием разнообразных факторов у вида формируются шишки разной величины, причём на однородной территории.

По размерам семян зафиксировали следующие данные: длина семени (длина указана с крылом) варьирует от 0,65 см (Курская область) до 1,37-1,39 см (Воронежская область). В природном ареале длина семени от 0,7 см до 1,15 см. Ширина семян практически в одном диапазоне 0,32 см (Курская) до 0,34-0,44 см (Воронежская). Но, другие количественные (количество штук семян в шишке, масса и т.д.) и качественные (соотношение полнозернистых и пустых семян) показатели потребовали тщательного анализа и поиска причин. При камеральной обработки недоразвитых семян в шишках не зафиксировано. Данные А.В.Семенютиной и Д.А. Сапроновой для Нижнего Поволжья свидетельствуют о вариации размеров семени от 0,41х0,19 см до 0,62х0,3 см.

Для наглядного и более понятного восприятия данных привели средние исследуемые показатели в таблице 2.

Общее количество семян в шишках изменяется от 19-20 штук до максимального 25 штук в крупных шишках (питомник). Содержатся семена в шишках, как правило, не по всей длине, а под чешуйками в средней части шишки. Полнозернистых семян в среднем на одну шишку от 12 (Курская область) до 14 (дендрарий) и 19 штук (питомник). Количество пустых семян на 100 исследуемых шишек в среднем составило от 6 (Воронежская область) до 8 штук (Курская). В процентном отношении чётко видно, что содержание пустых семян изменяется от 24,0 % (питомник) и 30,0 % (дендрарий) до 42,1 % в шишках, собранных в соседней области. Выявленные пустые семена фиксировались в шишках, обладающие минимальными размерами и ещё на фоне общего сниженного общего количества семян.

Предварительный вывод: при уменьшении размеров шишек наблюдается снижение количества полнозернистых семян, число пустых, как правило, сохраняется на прежнем уровне или плавно повышается.

При взвешивании семян увидели также разницу между тремя пунктами: масса 1 тысячи семян из Курской области – 10,16 ± 0,07 грамм; Воронежской области, дендрарий – 12,02 ± 0,05 грамм, питомник – 14,7 ± 0,05 грамм. В естественном ареале произрастания *P. menziesii* массу 1000 семян приводят в 15-20 грамм.

В шишках, где максимальное количество семян 19-20 штук масса оказывалась в пределах 0,21-0,24 грамм до 0,36 грамм (питомник), если связать с полнозернистыми семенами, то показатель массы семян варьирует в среднем пределах 0,12-0,17 грамм, увеличиваясь в Семилукском питомнике до 0,28 грамм. Одной из основных качественных характеристик генеративной сферы любого растительного компонента является степень изменчивости выбранных признаков.

Данные по изменчивости линейных показателей шишек и семян из трёх пунктов сбора наглядно демонстрирует рисунок 1.

Таблица 2

Вариабельность шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Table 2

Variability of cones and seeds *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Пункт сбора Collection point	Средние размеры шишек, см Average size of cones, cm	Средняя масса шишек в абсолютно сухом состоянии, г The average weight of cones in a completely dry state, g	Средние размеры семян, см Average size of seeds, cm	Среднее количество семян в шишках, штук Average number of seeds per cone, in pieces			Вес 1000 штук семян, г Weight of 1000 pieces of seeds, g
				Всего, штук Total, pieces	Полно-зернистых, штук Full-grain, pieces	Пустых, штук Empty, pieces	
Курская область Kursk region	4,66x3,04	8,84	0,55x0,32	19	11	8	11,16
Воронежская область, Семилукский питомник Voronezh Region, Semiluksky Nursery	6,06x4,81	11,21	0,59x0,35	25	19	6	14,70
Воронежская область, дендрарий Voronezh Region, Arboretum	6,08x3,71	11,10	0,57x0,34	20	14	6	12,02

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

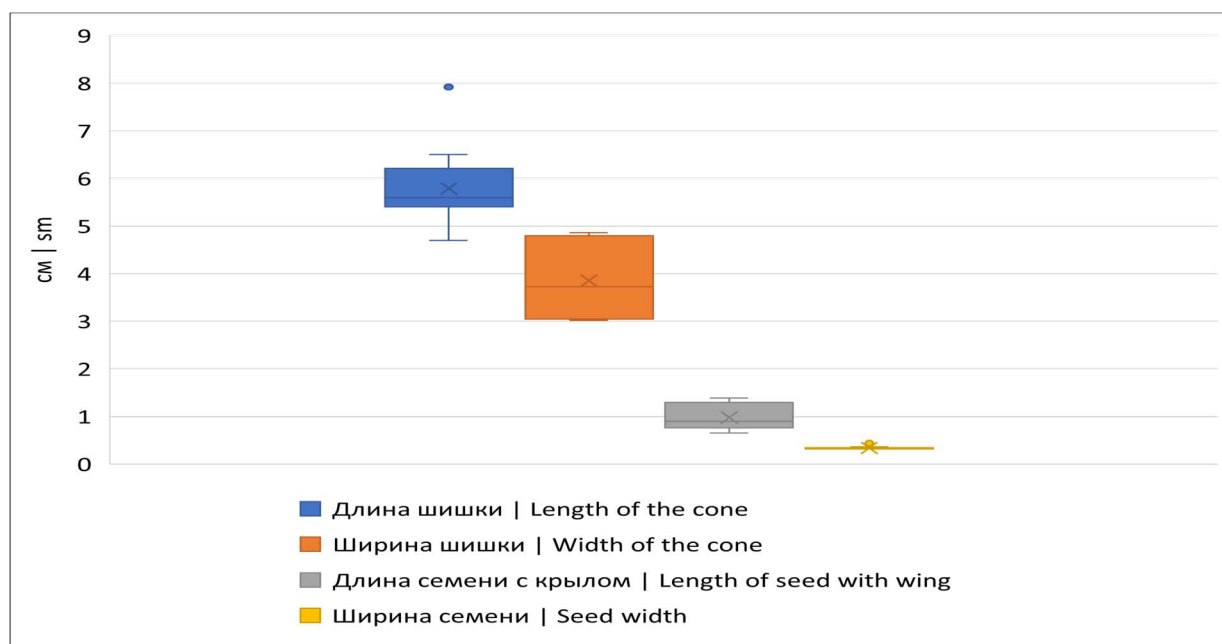


Рисунок 1. Изменчивость биометрических показателей шишек и семян

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco

Figure 1. Variability of biometric indicators of cones and seeds *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Степень изменчивости изучаемых признаков характеризуется коэффициентом вариации (CV). Был проведён детальный анализ по биометрическим признакам.

Коэффициент вариации длины шишки по всем трём пунктам сбора достигает значения 34,0 % (высокая вариабельность), ширина шишки варьирует чуть меньше – 32,3 %. Изменчивость длины семени с крылом (18,4 %) и ширины семени (6,1 %) соответствуют средней и низкой вариабельности.

Коэффициент вариации массы шишек в абсолютно сухом состоянии – 25,5 %. Коэффициентом вариации массы семян незначителен и равен 6,8 %.

Выполненная нами сортировка шишек по партиям (группа шишек по размерам) во всех пунктах сбора и проведенный корреляционный анализ между количеством семян и размерами шишек выявил следующие показатели корреляционных коэффициентов (r). Наиболее тесная связь между длиной шишек и количеством полнозернистых семян $r = 0,923$, и

сильно отрицательная между длиной шишки и количеством пустых семян $r = -0,750$.

Корреляционная зависимость между шириной шишек и количеством полнозернистых семян отличается чуть меньше теснотой связи $r = 0,833$, и между шириной шишек и количеством пустых семян $r = -0,651$. Не выявили достоверную корреляционную зависимость массы семян с их общим количеством.

Биометрические параметры аппроксимируются полиномиальной функцией второго порядка (рис. 2, 3, 4).

Коэффициент детерминации (R^2) по длине шишки плавно варьирует от 0,563 в Курской области до 0,78 (питомник) и практически максимального значения 0,96 (дендрарий) в Воронежской области при значении $p \leq 0,05$.

Коэффициент детерминации по ширине шишки варьирует, наоборот, очень резко: от 0,39 в Курской области, через среднее значение в питомнике ($R^2 = 0,63$) и снова, достигая своего максимума в дендрарии ($R^2 = 0,99$), при значении $p \leq 0,05$.

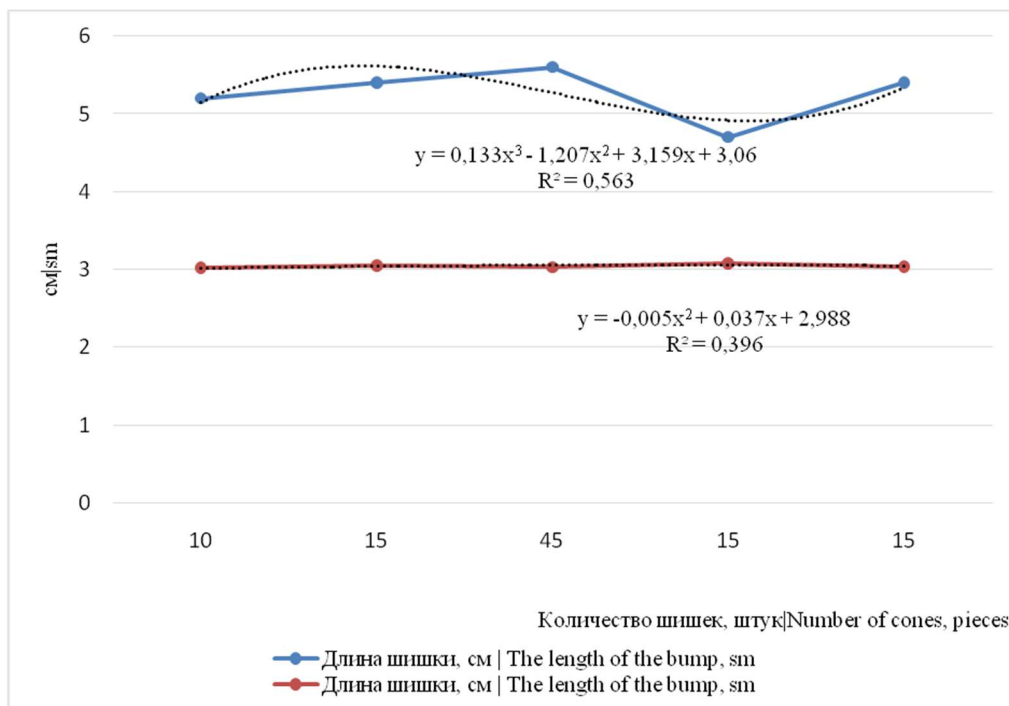


Рисунок 2. Биометрические показатели шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco в Курской области

Figure 2. Biometric indicators of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco cones and seeds in the Kursk region

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

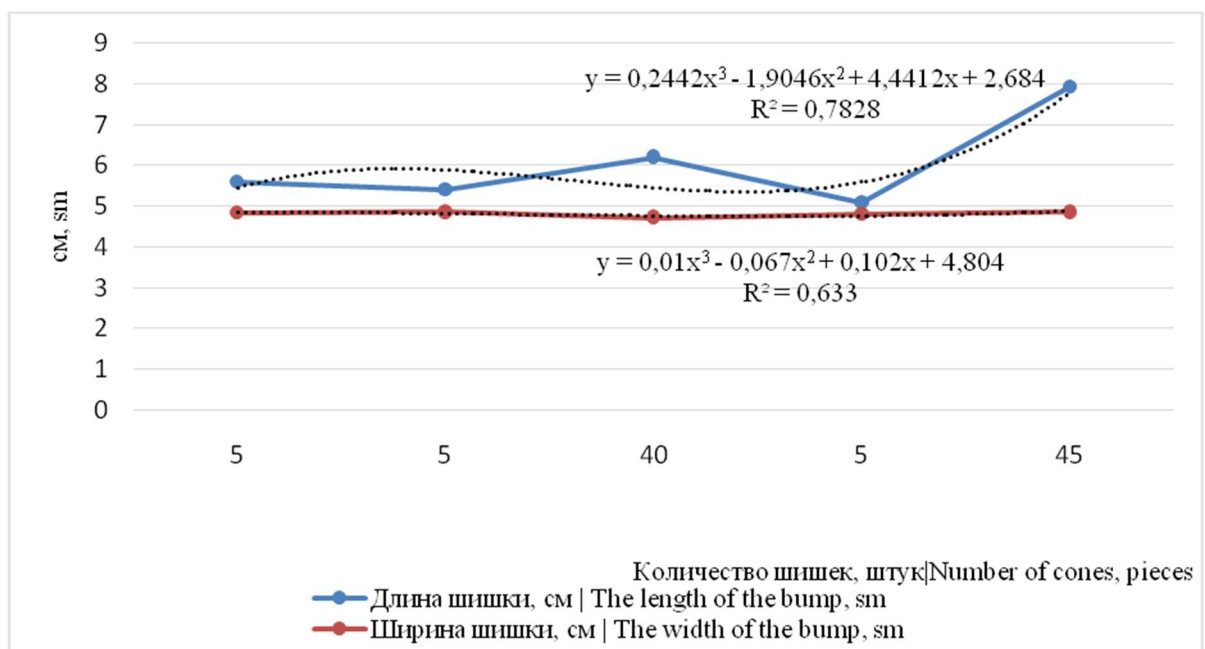


Рисунок 3. Биометрические показатели шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco в Воронежской области (питомник)

Figure 3. Biometric indicators of cones and seeds of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in Voronezh region (nursery)

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

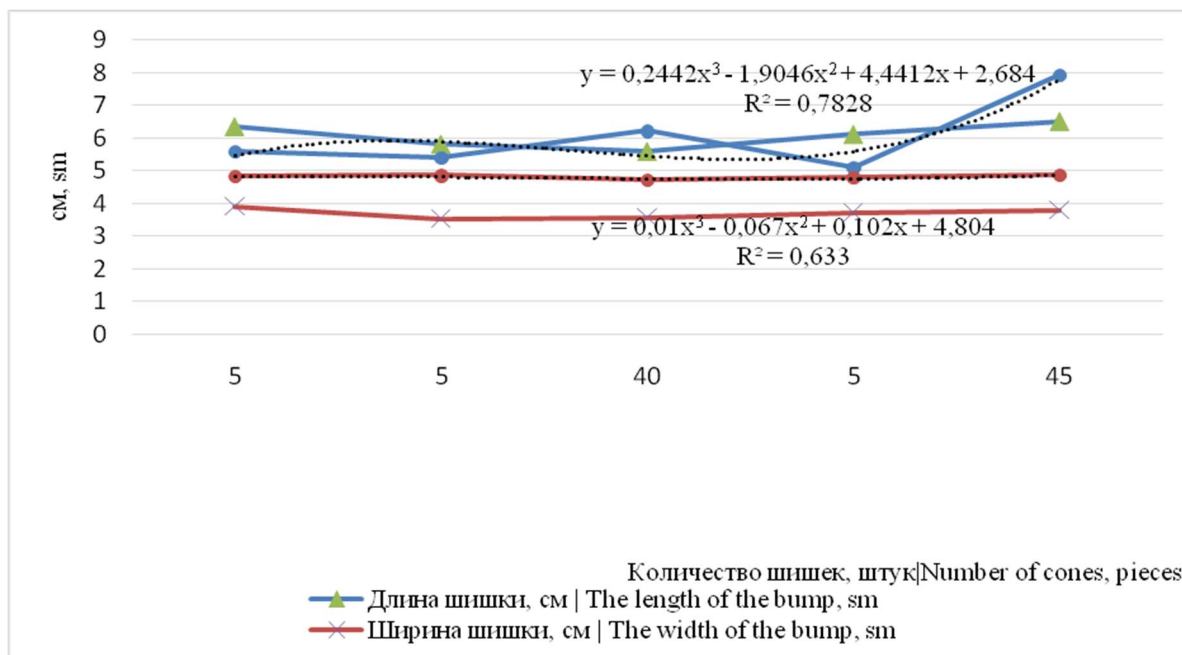


Рисунок 4. Биометрические показатели шишек и семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco в Воронежской области (питомник)

Figure 4. Biometric indicators of cones and seeds of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in Voronezh region (arboretum)

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

Воздействие комплекса биотических и абиотических факторов новой территории на растения-интродуценты перманентно и нераздельно. Но, непосредственное влияние на рост и развитие растений оказывают климатические (температура, влажность, количество осадков) и почвенные условия. Анализ метеоданных (табл. 3.) показывает увеличение температуры и низкое количество осадков особенно в первую декаду августа во всех пунктах сбора по

сравнению с климатологической стандартной нормой [30]. Это является не совсем благоприятным условием для формирования урожая шишек и семян. Во-вторых, погодные условия примерно одинаковы в Воронежской и Курской области и, проследить связь с линейными размерами не получится за один год исследования. Взаимосвязь от общего количества семян, полнотелых и пустых с географическими координатами, в частности с широтой вообще отсутствует: наблюдений за один год также недостаточно, и разница по широте составляет менее 1°.

Таблица 3

Метеоданные по пунктам сбора

Table 3

Weather data on collection points

Декады августа 2024 г The dec- ades of August 2024 year	Температура °C , Temperature, °C			Относительная влажность, % Relative humidity, %			Количество осадков, мм Precipitation, mm		
	Воро- неж Voro nezh	Семилуки Semiluki	Курск Kursk	Воро- неж Voro nezh	Семилуки Semiluki	Курск Kursk	Воро- неж Voro nezh	Семилуки Semiluki	Курск Kursk
1-10	23,6	29,7	23,4	76,8	64,3	65,8	12,1	11,0	18,0
11-20	22,1	29,6	23,0	67,6	52,3	70,6	21,0	12,0	12,0
21-31	17,35	26,0	20,0	72,6	63	52,0	15,1	14,0	11,6

Источник: метеоданные сайта <http://www.pogodaiklimat.ru>

Source: the site's weather data <http://www.pogodaiklimat.ru>

Обсуждение

Известно, что работы по интродукции псевдотсуги Мензиса ведутся во многих странах мира. Ряд исследований свидетельствует об устойчивости в сравнении с местными видами хвойных пород. Анализируя данные исследователей по эколого-биологическим характеристикам вида, обнаруживаем сведения об устойчивости всходов *P. menziesii* при возрастающей температуре воздуха сочетании с засухой. Учитывая потенциальные видовые возможности *P. menziesii*, лесоводы вводят данную породу в состав лесных насаждений. Современная литература не содержит детализированных рекомендаций по введению вида в различные типы лесных насаждений в качестве сопутствующей породы. Адаптационные возможности вида выявлены на обширных территориях РФ, конкретно на территории Среднего и Нижнего Поволжья. Отмечаем, что аналогичных исследований в ЦЧР проведено не было. В данной работе впервые изучены взаимосвязи биометрических показателей шишек и семян в условиях лесостепной и степной зон. Конечной целью исследования является модификация и конкретизация традиционных методик размножения.

Заключение

Впервые в регионе изучена взаимосвязь размеров генеративных органов, оценён потенциал

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco в новых условиях ареала путем сравнения данных по двум областям ЦЧР.

Зафиксированы некоторые тренды в данной взаимосвязи. При наблюдении визуально, крупные шишки развиваются в несколько выше середины кроны, и в городских условиях (дендрарий) их созревание проходит активнее.

Обильному заложению шишек не способствовала высокая положительная температура в начале августа, но получить достоверные различия по двум областям за один год исследований не представляется возможным.

Необходимо помнить и о том, что генетические особенности вида и места происхождения исходных насаждений являются доминирующими фактором и оказывают влияние на все биологические проявления вида.

При увеличении шишек по длине и ширине увеличивается общее количество семян, в том числе и количество полнозернистых семян, количество пустых семян или сохраняется на прежнем уровне, если и повышается, то незначительно. Были выявлены прочные положительные связи между длиной шишек и количеством полнозернистых семян $r = 0,923$, и сильно отрицательная между длиной шишки и количеством пустых семян $r = -0,750$. Конечно же,

содержание семян является непостоянной величиной и будет меняться при примерно равных размерах шишек в сборных партиях. И, как на это указывают дендрологи и лесоводы – от чередования урожайных и неурожайных лет.

Коэффициент вариации длины шишки по всем трём пунктам сбора достигает значения 34,0 % (высокая вариабельность), ширина шишки варьирует чуть меньше – 32,3 %. Изменчивость длины семени с крылом (18,4 %) и ширины семени (6,1 %) соответствуют средней и низкой вариабельности.

Таким образом, впервые было показано для ЦЧР, что наблюдается столь высокая тесная связь между длиной шишки и числом полновесных семян, установлены высокие значения коэффициентов корреляции и т.д. Полученные сведения позволяют рекомендовать к использованию для посева полученные местные семена для начала в лабораторных условиях, затем в грунт. Для дальнейшей интродукции наиболее перспективен материал из питомника.

Конечной целью исследования является разработка подробных рекомендаций по введению *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco в различные типы лесных насаждений ЦЧР в качестве сопутствующей породы.

Список литературы

1. Himes, A., et al. (2023). Forestry in the face of global change: Results of a global survey of professionals. *Current Forestry Reports*, 9(6), 473–489. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00205-1>
2. Knoke, T., Paul, C., Gosling, E., Jarisch, I., & Mohr, J. (2023). The economics of mixed species forestry. *Environmental and Resource Economics*, 84, 343–381. <https://doi.org/10.1007/s10640-022-00719-5>
3. Barker-Rothschild, D., Stoyanov, S. R., Gieleciak, R., Cruickshank, M., Filipescu, C. N., Dunn, D., & Choi, P. (2023). Assessing the impact of drought-induced abiotic stress on the content and composition of Douglas-fir lignin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(37), 13519–13526. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c02720>
4. Mirabel, A., Girardin, M. P., Metsaranta, J., Way, D., & Reich, P. B. (2023). Increasing atmospheric dryness reduces boreal forest tree growth. *Nature Communications*, 14(1), 6901. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42466-1>
5. Montagne-Huck, C., & Brunette, M. (2018). Economic analysis of natural forest disturbances: A century of research. *Journal of Forest Economics*, 32, 42–71. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2018.03.002>
6. Pretzsch, H., et al. (2023). Forest growth in Europe shows diverging large regional trends. *Scientific Reports*, 13(1), 15373. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41077-6>
7. Ritze, E., Schebeck, M., & Kirisits, T. (2023). The pine pathogen *Diplodia sapinea* is associated with the death of large Douglas fir trees. *Forest Pathology*, 53(4), e12823. <https://doi.org/10.1111/efp.12823>
8. Glatthorn, J., et al. (2023). Species diversity of forest floor biota in non-native Douglas-fir stands is similar to that of native stands. *Ecosphere*, 14(7), e4609. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4609>
9. Lalora, A. R., et al. (2023). Mortality thresholds of juvenile trees to drought and heatwaves: Implications for forest regeneration across a landscape gradient. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1198156. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1198156>
10. Crockett, J. L., & Hurteau, M. D. (2023). Ability of seedlings to survive heat and drought portends future demographic challenges for five southwestern US conifers. *Tree Physiology*, 44(1), tpad136. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad136>
11. Fanal, A., Porte, A., Mahy, G., & Monty, A. (2023). Fast height growth is key to non-native conifers invasiveness in temperate forests. *Biological Invasions*, 26(3), 857–874. <https://doi.org/10.1007/s10530-023-03214-0>
12. Huber, C., et al. (2023). Potential alternatives for Norway spruce wood: A selection based on defect-free wood properties. *Annals of Forest Science*, 80(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01206-7>
13. Gang, B., Bingham, L., Gosling, E., & Knoke, T. (2023). Assessing the suitability of under-represented tree species for multifunctional forest management – An example using economic return and biodiversity indicators. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 97(2), 255–266. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad038>

14. Plaga, B. N. E., Bauhus, J., Pretzsch, H., Gonzalez, M., & Forrester, D. I. (2023). Influence of crown and canopy structure on light absorption, light use efficiency, and growth in mixed and pure *Pseudotsuga menziesii* and *Fagus sylvatica* forests. *European Journal of Forest Research*, 143(2), 479–491. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01638-w>
15. Dagley, C. M., Berrill, J.-P., & Fraver, S. (2023). Forest restoration mitigates drought vulnerability of coast Douglas-fir in a Mediterranean climate. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(3), 210–216. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0119>
16. Schimleck, L. R., Jayawickrama, K. J. S., & Ye, T. Z. (2023). Wood property genetic parameter estimation from first-generation Douglas-fir progeny tests. *Wood Science and Technology*, 58(1), 295–312. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01516-z>
17. Peltier, D. M. P., et al. (2023). Old reserves and ancient buds fuel regrowth of coast redwood after catastrophic fire. *Nature Plants*, 9(12), 1978–1985. <https://doi.org/10.1038/s41477-023-01581-z>
18. Schneider, K. A., Berrill, J.-P., Dagley, C. M., Webb, L. A., & Hohl, A. (2023). Residual stand structure and topography predict initial survival and animal browsing of redwood and Douglas-fir seedlings planted in coastal forests of Northern California. *Sustainability*, 15(23), 16409. <https://doi.org/10.3390/su152316409>
19. Аббарова А.Р. Псевдотсуга Мензиса в Башкирском Предуралье: посевные качества семян // Вестник ОГУ. – 2009. – №6. – С. 22-24. URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22407275>.
20. Торчик В.И., Холопук Г.А. Интродукция Псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) в условиях Беларуси. – 2013. – 139 с. URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44556191>.
21. Дебринюк Ю.М. Посевные качества семян *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco в насаждениях западного региона Украины // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. – 2016. – Т. XIX. – № XIX (1). – С. 23-26. URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27320701>.
22. Щепотьев Ф.Л. Дугласия. – М. : Лесн. пром-сть, 1982. – 80 с.
23. Dorofeeva V.D., Degtyareva S.I., Komarova O.V., Shipilova V.F. Generative and vegetative reproduction of *Pseudotsuga Menziesii* (mirb.) Franco in the Central Chernozem Region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions" (Forestry-2019). 2019; 012044. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012044>.
24. Мурая Л.С., Буторина А.К., Дудецкая Е.М. Кариотипическая характеристика трёх различных популяций псевдотсуги // Лесоведение. – 1976. – №6. – С. 66-71.
25. Кузнецова Г.В. Межпопуляционная изменчивость размера шишек и массы семян сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* du Tour.) // Хвойные бореальной зоны. – 2022. – XL. – №5. – С. 369-373. DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-5-369-373>.
26. Крук Н.К., Якимов Н.И., Тупик П.В., Юреня А.В. Морфометрические показатели деревьев и шишек и качество семян на лесосеменной плантации сосны Веймутовой // Труды БГТУ. – 2020. – 1. – №1. – С. 63-68. URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42400219>.
27. Тупик П.В. Повышение качества семян хвойных интродуцентов методом флотации // Проблемы лесоведения и лесоводства: сборник научных трудов; Национальная академия наук Беларуси, Институт леса. Выпуск 68. – Минск: Институт леса Национальной академии наук Беларуси, 2008. – С. 290-298. Режим доступа: URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45757621>.
28. Семенютина А.В., Сапронова Д.А. Перспективность интродукции для озеленения Нижнего Поволжья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2014. – 1. – 33. – С. 69-73. Режим доступа: URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21369676>.
29. Аникеев Д. Р., Бабушкина Л. Г., Зуева Г. В. Состояние репродуктивной системы сосны обыкновенной при аэротехногенном загрязнении. – Екатеринбург: УГЛТА, 2000. – 81 с. Режим доступа: URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9188872>.
30. Дегтярева С.И., Дорофеева В.Д., Шипилова В.Ф. Генеративное размножение *Picea pungens* Engelm. в урбосреде Воронежа: анализ лабораторной всхожести от стратификации семян. Лесотехнический журнал. – 2024. – 14. – № 3(55). – С. 75-88. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/5>.
31. Погода и климат. Режим доступа: URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 19.06.2025).

References

1. Himes, A., et al. (2023). Forestry in the face of global change: Results of a global survey of professionals. *Current Forestry Reports*, 9(6), 473–489. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00205-1>
2. Knoke, T., Paul, C., Gosling, E., Jarisch, I., & Mohr, J. (2023). The economics of mixed species forestry. *Environmental and Resource Economics*, 84, 343–381. <https://doi.org/10.1007/s10640-022-00719-5>
3. Barker-Rothschild, D., Stoyanov, S. R., Gieleciak, R., Cruickshank, M., Filipescu, C. N., Dunn, D., & Choi, P. (2023). Assessing the impact of drought-induced abiotic stress on the content and composition of Douglas-fir lignin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(37), 13519–13526. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c02720>
4. Mirabel, A., Girardin, M. P., Metsaranta, J., Way, D., & Reich, P. B. (2023). Increasing atmospheric dryness reduces boreal forest tree growth. *Nature Communications*, 14(1), 6901. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42466-1>
5. Montagne-Huck, C., & Brunette, M. (2018). Economic analysis of natural forest disturbances: A century of research. *Journal of Forest Economics*, 32, 42–71. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2018.03.002>
6. Pretzsch, H., et al. (2023). Forest growth in Europe shows diverging large regional trends. *Scientific Reports*, 13(1), 15373. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41077-6>
7. Ritze, E., Schebeck, M., & Kirisits, T. (2023). The pine pathogen *Diplodia sapinea* is associated with the death of large Douglas fir trees. *Forest Pathology*, 53(4), e12823. <https://doi.org/10.1111/efp.12823>
8. Glatthorn, J., et al. (2023). Species diversity of forest floor biota in non-native Douglas-fir stands is similar to that of native stands. *Ecosphere*, 14(7), e4609. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4609>
9. Lalora, A. R., et al. (2023). Mortality thresholds of juvenile trees to drought and heatwaves: Implications for forest regeneration across a landscape gradient. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1198156. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1198156>
10. Crockett, J. L., & Hurteau, M. D. (2023). Ability of seedlings to survive heat and drought portends future demographic challenges for five southwestern US conifers. *Tree Physiology*, 44(1), tpad136. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad136>
11. Fanal, A., Porte, A., Mahy, G., & Monty, A. (2023). Fast height growth is key to non-native conifers invasiveness in temperate forests. *Biological Invasions*, 26(3), 857–874. <https://doi.org/10.1007/s10530-023-03214-0>
12. Huber, C., et al. (2023). Potential alternatives for Norway spruce wood: A selection based on defect-free wood properties. *Annals of Forest Science*, 80(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01206-7>
13. Gang, B., Bingham, L., Gosling, E., & Knoke, T. (2023). Assessing the suitability of under-represented tree species for multifunctional forest management – An example using economic return and biodiversity indicators. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 97(2), 255–266. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad038>
14. Plaga, B. N. E., Bauhus, J., Pretzsch, H., Gonzalez, M., & Forrester, D. I. (2023). Influence of crown and canopy structure on light absorption, light use efficiency, and growth in mixed and pure *Pseudotsuga menziesii* and *Fagus sylvatica* forests. *European Journal of Forest Research*, 143(2), 479–491. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01638-w>
15. Dagley, C. M., Berrill, J.-P., & Fraver, S. (2023). Forest restoration mitigates drought vulnerability of coast Douglas-fir in a Mediterranean climate. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(3), 210–216. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0119>
16. Schimleck, L. R., Jayawickrama, K. J. S., & Ye, T. Z. (2023). Wood property genetic parameter estimation from first-generation Douglas-fir progeny tests. *Wood Science and Technology*, 58(1), 295–312. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01516-z>
17. Peltier, D. M. P., et al. (2023). Old reserves and ancient buds fuel regrowth of coast redwood after catastrophic fire. *Nature Plants*, 9(12), 1978–1985. <https://doi.org/10.1038/s41477-023-01581-z>
18. Schneider, K. A., Berrill, J.-P., Dagley, C. M., Webb, L. A., & Hohl, A. (2023). Residual stand structure and topography predict initial survival and animal browsing of redwood and Douglas-fir seedlings planted in coastal forests of Northern California. *Sustainability*, 15(23), 16409. <https://doi.org/10.3390/su152316409>
19. Abrarova A.R. Pseudotsuga Menzisa v Bashkirskom Predural'e: posevny'e kachestva semyan [Pseudotsuga Menziesii in the Bashkir Cis-Urals: Seed Sowing Qualities]. *Vestnik OGU = Vestnik OGU*. 2009; (6): 22–24. (in Russ). URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22407275>.

20. Torchik V.I., Xolopuk G.A. Introdukciya Psevdotsugi Menzisa (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) v usloviyax Belarusi [Introduction of Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco in Belarus]. 2013; 139 (in Russ). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44556191>.
21. Debrinyuk Yu.M. Posevny'e kachestva semyan Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco v nasazhdeniyax zapadnogo regiona Ukrainy [Sowing qualities of seeds of Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco in plantations of the western region of Ukraine]. Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukciya drevesny'x rastenij = Fruit growing, seed growing, introduction of woody plants. 2016; XIX (1): 23-26. (in Russ). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27320701>.
22. Shhepot'ev F.L. Duglasiya [Douglasia]. – M.: Lesn. prom-st', 1982. – S. 80. (in Russ).
23. Dorofeeva V.D., Degtyareva S.I., Komarova O.V., Shipilova V.F. Generative and vegetative reproduction of Pseudotsuga Menziesii (mirb.) Franco in the Central Chernozem Region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions" (Forestry-2019). 2019; 012044. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012044>.
24. Muraya L.S., Butorina A.K., Dudeczkaya E.M. Kariotipicheskaya xarakteristika tryox razlichny'x populyacij psevdotsugi [Karyotypic Characteristics of Three Different Pseudotsuga Populations]. Lesovedenie = Lesovedenie. 1976 (6): 66-71. (in Russ).
25. Kuzneczova G.V. Mezhpopyacionnaya izmenchivost' razmera shishek i massy' semyan sosny' sibirskoj kedrovoj (Pinus sibirica du Tour.) [Interpopulation Variability of the Cones and Seed Mass of the Siberian Cedar Pine (Pinus sibirica du Tour.)]. Xvojny'e boreal'noj zony' = Conifers of the Boreal Zone. 2022. XL (№5): 369-373. (in Russ). DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-5-369-373>.
26. Kruk N.K., Yakimov N.I., Tupik P.V., Yurenja A.V. Morfometricheskie pokazateli derev'ev i shishek i kachestvo semyan na lesosemennoj plantacii sosny' Vejmutovoj [Morphometric indicators of trees and cones and seed quality in a Weimut pine forest seed plantation]. Trudy' BGTU= Proceedings of BSTU. 2020. 1(1): 63-68. (in Russ). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42400219>.
27. Tupik P.V. Povy'shenie kachestva semyan xvojny'x introducentov metodom flotacii. Problemy' lesovedeniya i lesovodstva [Improving the quality of coniferous introductions seeds by flotation // Problems of forest science and forestry: collection of scientific papers] : sbornik nauchny'x trudov; Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Institut lesa = National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Forest. Minsk : Institut lesa Nacional'noj akademii nauk Belarusi. 2008 (68): 290-298. (in Russ). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45757621>.
28. Semenytina A.V., Sapronova D.A. Perspektivnost' introdukcii dlya ozeleneniya Nizhnego Povolzh'ya [Prospects for introduction for landscaping in the Lower Volga region] Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa= News of the Lower Volga Agro-University Complex. 2014. 1(33):69-73. (in Russ). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21369676>.
29. Anikeev D. R., Babushkina L. G., Zueva G. V. Sostoyanie reproduktivnoj sistemy' sosny' oby'knovennoj pri ae'rotexnogennom zagryaznenii [The state of the reproductive system of Scots pine under aerotechnogenic pollution]. Ekaterinburg: UGLTA=Yekaterinburg: UGLTA. 2000. 81 p. (in Russ). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9188872>.
30. Degtyareva S.I., Dorofeeva V.D., Shipilova V.F. Generativnoe razmnzhenie Ricea pungens Engelm. v ur-bosrede Voronezha: analiz laboratornoj vsxozhesti ot stratifikacii semyan [Generative reproduction of Picea pungens Engelm. in the urban environment of Voronezh: analysis of laboratory germination from seed stratification]. Lesotexnicheskij zhurnal= Lesotekhnicheskij Zhurnal. 2024. – 14. 3(55): 75-88. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/5>.
31. Pogoda i klimat. [Weather and climate] URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (data obrashheniya: 19.06.2025).

Сведения об авторах

☑ *Дегтярева Светлана Ивановна* – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры ботаники и дендрологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3825-1158>, e-mail: degtjarewa-lana@yandex.ru.

Одинцов Анатолий Николаевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела биоразнообразия, рационального лесопользования и лесовыращивания ФГБУ «ВНИИЛГИСБиотех», ул. Ломоносова, 105, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7205-7688>, e-mail: sort3@yandex.ru.

Дорофеева Валентина Дмитриевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ботаники и дендрологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: [http:// orcid.org/0000-0003-3624-6304](http://orcid.org/0000-0003-3624-6304), e-mail: ekzo40@mail.ru.

Шипилова Валентина Фёдоровна – заведующий отделом опытных испытаний (лесопарковый участок) ФГБУ «ВНИИЛГИСБиотех», ул. Ломоносова, 105, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: [http:// orcid.org/ https://orcid.org/0009-0004-2069-1638](http://orcid.org/0009-0004-2069-1638)

Information about the authors

✉ *Svetlana I. Degtyareva* – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Botany and Dendrology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: [http:// orcid.org/0000-0003-3825-1158](http://orcid.org/0000-0003-3825-1158), e-mail: degtyarewa-lana@yandex.ru.

Anatoly N. Odintsov – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher at the Department of Biodiversity, Rational Forest Management and Reforestation of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, 105, Lomonosov street, Voronezh, 394087; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7205-7688>, e-mail: sort3@yandex.ru.

Valentina D. Dorofeeva – Cand. Sci (Agric), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Botany and Dendrology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, orcid: [http:// orcid.org/0000-0003-3624-6304](http://orcid.org/0000-0003-3624-6304), e-mail: ekzo40@mail.ru.

Valentina F. Shipilova – Head of the Experimental Testing Department (forest park area) of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, 105, Lomonosov street, Voronezh, 394087; orcid: [http:// orcid.org/0009-0004-2069-1638](http://orcid.org/0009-0004-2069-1638) e-mail: lesopark.vrn@yandex.ru.

✉ – Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/3>

УДК 630 416.16:6305



Влияние уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на запас и на долю участия пихтовых древостоев в породном составе лесных насаждений Пермского края

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

Евгений Г. Большаков², b.e.g@mail.ru <https://orcid.org/0009-0000-9701-940X>

Эдуард Е. Ротэрмель¹, edvard_rottermel@mai.ru <https://orcid.org/0009-0007-0238-9178>

¹Естественнонаучный институт ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614068, Российская Федерация

²Пермский филиал ФГБУ «Рослесинфорг», ул. Маришутная, 14Ж, г. Пермь, 614990, Российская Федерация

В последние годы по регионам России молниеносно распространяется стволовой вредитель дальневосточного происхождения уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandford, далее по тексту: *P. proximus*), заселяющий пихтовые древостои. *P. proximus* способен привести к значительному сокращению запаса пихтовых древостоев, а также к исчезновению породы из состава лесных насаждений. Цель исследования – оценка изменения запаса и доли участия пихтовых древостоев в породном составе насаждений от воздействия *P. proximus* в условиях Южно-таежного района европейской части Российской Федерации Пермского края. Объектом исследования послужили пихтовые древостои, произрастающие на территории Добрянского и Пермского лесничеств. Проанализированы материалы актов лесопатологических обследований, проведенных лесопатологами ГБУ ПК «Гослесхоз» и Центра защиты леса Пермского края в период с 2022 по 2024 годы, которыми зафиксировано усыхание пихтовых древостоев от воздействия уссурийского полиграфа. В результате установлено, что в среднем в насаждениях всех типов леса после воздействия *P. proximus* доля запаса погибших деревьев пихты превышает долю запаса живых, а участие пихты в формуле состава древостоев в результате усыхания сокращается на 1 единицу. В ельниках липовых доля погибших деревьев превосходит долю живых в среднем в 2,5 раза! Полная гибель пихтовых древостоев отмечена в 21,4% случаев, причем наибольшая доля полностью погибших древостоев пихты зафиксирована в насаждениях липового типа леса (14,2%). По мнению авторов, массовое усыхание деревьев пихты в условиях липового типа леса объясняется невысокой долей участия пихтовых древостоев в породном составе насаждений указанного типа леса. Установлена слабая статистически значимая обратная корреляционная зависимость между долей участия пихты в составе древостоев и долей погибших от воздействия *P. proximus* деревьев.

Ключевые слова: уссурийский полиграф, усыхание, пихтовые древостои, средневзвешенный балл санитарного состояния древостоев, запас древостоя, породный состав лесных насаждений, Пермский край

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: Иванчина, Л. А. Влияние уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на запас и на долю участия пихтовых древостоев в породном составе лесных насаждений Пермского края / Л. А. Иванчина, Е. Г. Большаков, Э. Е. Ротэрмель // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 37–54. – Библиогр.: с. 50–54 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/3>.


Поступила 29.03.2025. Пересмотрена 31.08.2025. Принята 15.09.2025. Опубликовано онлайн 25.09.2025.

Article

The influence of the *Polygraphus proximus* Blandford on the stock and share of fir stands in the species composition of forest plantations in the Perm Krai

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

Evgeny G. Bolshakov², b.e.g@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0000-9701-940X>

Eduard E. Rotermel¹, edvard_rottermel@mai.ru  <https://orcid.org/0009-0007-0238-9178>

¹Natural Science Institute of Perm State University, 15 Bukireva str., Perm, Russian Federation

²Roslesinforg Federal State Budgetary Institution, Perm branch, 14Zh Marshrutnaya str., Perm, Russian Federation

Abstract

In recent years, the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford, hereinafter referred to as *P. proximus*), a stem pest of Far Eastern origin, has been spreading rapidly across the regions of Russia, inhabiting fir stands. The *P. proximus* can lead to a significant reduction in the stock of fir stands, as well as to the disappearance of the species from the composition of forest plantations. The purpose of the study is to assess the changes in the stock and share of fir stands in the species composition of plantations due to the influence of the *P. proximus* in the conditions of the South-taiga region of the European part of the Russian Federation, Perm Krai. The objects of the study are fir stands growing on the territory of the forestries of Dobryanka and Perm. The materials of the acts of forest pathology surveys conducted by forest pathologists of SBI PK «Gosleskhov» and the Center for Forest Protection of the Perm Krai in the period from 2022 to 2024, which recorded the drying out of fir stands from the effects of the *P. proximus*, were analyzed. As a result, it is established that, on average, in plantations of all types of forests after the impact of *P. proximus*, the share of dead fir trees exceeds the share of living trees, and the participation of fir in the composition formula of forest stands decreases by 1 unit as a result of drying out. In linden spruce forests, the proportion of dead trees exceeds the proportion of living trees by an average of 2.5 times! The complete death of fir stands is noted in 21.4% of cases, with the largest proportion of completely dead fir stands recorded in linden forest type plantations (14.2%). According to the authors, the high mortality of fir trees in the conditions of the linden forest type is explained by the low share of fir stands in the species composition of the plantations of this type of forest. The weak statistically significant inverse correlation between the proportion of fir in the composition of stands and the proportion of trees affected by *P. proximus* is found.

Keywords: four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford), drying out, fir stands, average weighted score of the sanitary condition of stands, growing stock, species composition of forest plantations, Perm Krai

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., Bolshakov E. G., Rotermel' E. E. (2025). The influence of the *Polygraphus proximus* Blandford on the stock and share of fir stands in the species composition of forest plantations in the Perm Krai. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 37-54 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/3>

Received 29.03.2025. Revised 31.08.2025. Accepted 15.09.2025. Published online 25.09.2025.

Введение

К нарушениям лесного покрова приводят разные природные факторы. В частности, в Европе максимальная потеря лесов (46%) происходит от ветровалов, 24% лесов теряется от пожаров и 17% лесов гибнет от воздействия вредителей, преимущественно стволовых [24]. Однако в последние десятилетия на фоне глобального потепления климата леса все больше теряют устойчивость к воздействию болезней и вредителей [18-23]. Площадь потерь лесов в Европе вследствие вспышек массового размножения вредителей удвоилась за последние 20 лет [24]. В России вспышки массового размножения вредителей, охватывающие огромные площади, – один из самых существенных факторов гибели древостоев. Ведущую роль в составе насекомых-дендрофагов играют стволовые вредители [4, 11, 17]. В последние годы по регионам России молниеносно распространяется стволовой вредитель дальневосточного происхождения уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandford, далее по тексту: *P. proximus*), заселяющий пихтовые древостои [3, 6, 8, 10]. В лесах Пермского края указанный инвазивный вредитель обнаружен в 2022 году [10]. *P. proximus* способен разрушить пихтовые древостои на больших площадях [5] и тем самым привести к значительному сокращению запаса пихтовых древостоев, а также к исчезновению породы из состава лесных насаждений.

Цель исследования – оценка изменения запаса и доли участия пихтовых древостоев в породном составе насаждений от воздействия *P. proximus* в условиях Южно-таежного района европейской части Российской Федерации Пермского края.

Материалы и методы

Объектом исследования служили лесные насаждения Добрянского и Пермского лесничеств Пермского края, в породном составе которых имеются пихтовые древостои, подвергшиеся заселению уссурийским полиграфом. Указанные лесничества расположены в Южно-таежном районе европейской части Российской Федерации [13].

Чистые пихтарники в районе исследования отсутствуют. Деревья пихты произрастают совместно с древостоями, состоящими из других пород деревьев.

В ходе исследований проанализированы материалы актов лесопатологических обследований, которыми зафиксирована гибель деревьев пихты от воздействия *P. proximus*. Лесопатологические обследования (далее – ЛПО) проводились лесопатологами ГБУ ПК «Гослесхоз» и Центра защиты леса Пермского края в период с 2022 по 2024 годы.

Лесопатологическое обследование проводится в соответствии с приказом Минприроды России от 9 ноября 2020 года № 910 «Об утверждении Порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологического обследования» [15]. ЛПО осуществлялось методом закладки реласкопических площадок. На каждый лесопатологический выдел закладывалось несколько реласкопических площадок: их количество определялось требованиями действующей Лесоустроительной инструкции и требованиями действующего Порядка отвода и таксации лесосек [12, 14]. Категория санитарного состояния каждого дерева определялась визуально в соответствии со шкалой, представленной в действующих Правилах санитарной безопасности в лесах [16]. Повреждение деревьев вредителями и болезнями оценивалось визуально.

В камеральных условиях произведен расчет таксационных показателей по общеизвестным в лесной таксации формулам, определена встречаемость вредителей и болезней. Расчет и оценка средневзвешенного балла санитарного состояния каждой породы и насаждения в целом выполнены по методике, представленной в приложении 2 Правил санитарной безопасности в лесах [16]. При распределении категорий санитарного состояния к живым относили деревья, имеющие следующие категории санитарного состояния: «без признаков ослабления», «ослабленные» и «сильно ослабленные», к погибшим – «усыхающие», «свежий сухостой» и «старый сухостой», а к захламленности – ветровал и бурелом.

По результатам камеральной обработки данных полевых обследований в материалах актов ЛПО содержатся следующие сведения: фактическая таксационная характеристика лесных насаждений, распределение запаса каждой породы по категориям санитарного состояния, средневзвешенный балл санитарного состояния каждой породы, причины повреждения насаждений, виды и встречаемость вредителей

и болезней, пространственное расположение обследованных участков.

В течение 3 лет лесопатологами обследовано 112 лесных участков общей площадью 1891,7 га (табл. 1).

Количество и площадь обследованных лесных участков, в границах которых зафиксировано наличие вредителя уссурийского полиграфа

The number and area of surveyed forest plots within the boundaries of which the presence of the four-eyed fir bark beetle has been recorded

Лесничество Forestry department	Количество и площадь обследованных лесных участков в году, шт./га Number and area of surveyed forest plots per year, pcs/ha			Итого, шт./га Total, pcs/ha
	2022	2023	2024	
Добрянское Dobryanskoe	<u>53</u> 984,8	<u>17</u> 370,3	<u>13</u> 191,7	<u>83</u> 1546,8
Пермское Permское	<u>6</u> 47,6	<u>1</u> 11	<u>22</u> 286,3	<u>29</u> 344,9
Итого, шт./га Total, pcs/ha	<u>59</u> 1032,4	<u>18</u> 381,3	<u>35</u> 478,0	<u>112</u> 1891,7

Источник: собственные вычисления авторов
Source: calculations of the authors

Больше всего насаждений обследовано в Добрянском лесничестве в 2022 году (53 насаждения общей площадью 984,8 га).

Карта-схема расположения обследованных за 3 года лесных участков представлена на рис. 1.

Основные таксационные характеристики, рассчитанные по живой части обследованных насаждений, представлены в табл. 2. Очаги заселения пихтовых древостоев уссурийским полиграфом обнаружены в насаждениях 4 типов леса: в ельниках зеленомошного, кисличного, липового и широколиственного типов леса. Количество заложенных реласкопических площадок в пределах обследованных выделов варьирует от 4 до 25. В среднем заложено 11 реласкопических площадок на выдел. Средний возраст пихтовых древостоев варьирует от 60 до 140 лет. Наиболее часто встречаются пихтовые древостои в возрасте 100 лет. Полнота древостоев варьирует от 0,05 до 0,99. Очень низкое значение полноты в одном насаждении (0,05) объясняется практически полной гибелью древостоя: как деревьев пихты, так и деревьев других пород. Среднее значение полноты об-

щей выборки древостоев составляет 0,53 (низкополнотные), наиболее часто встречаются древостои с полнотой 0,49 (низкополнотные).

В насаждениях большинства типов леса преобладают низкополнотные древостои: в ельнике зеленомошном (среднее значение полноты – 0,5, максимальное – 0,58), в ельнике кисличном (среднее значение – 0,49, мода – 0,44) и в ельнике широколиственном (среднее значение – 0,43, мода – 0,4). Самые высокие значения полноты древостоев зафиксированы в ельнике липовом: в одном насаждении полнота древостоя достигает 0,99 (высокополнотный древостой). В среднем она составляет 0,63 (среднеполнотный древостой), а наиболее часто встречаются древостои с полнотой 0,61 (среднеполнотный древостой).

Построение графиков и диаграмм, расчет статистических показателей выполнены в программном обеспечении Microsoft Excel версии 2019 года. Карта-схема подготовлена в программе QGIS версии 3.22. Расчет коэффициентов корреляции Спирмена осуществлен в программном обеспечении Statistica 12. Сила связи коэффициентов корреляции оценивалась по шкале Чеддока [1].

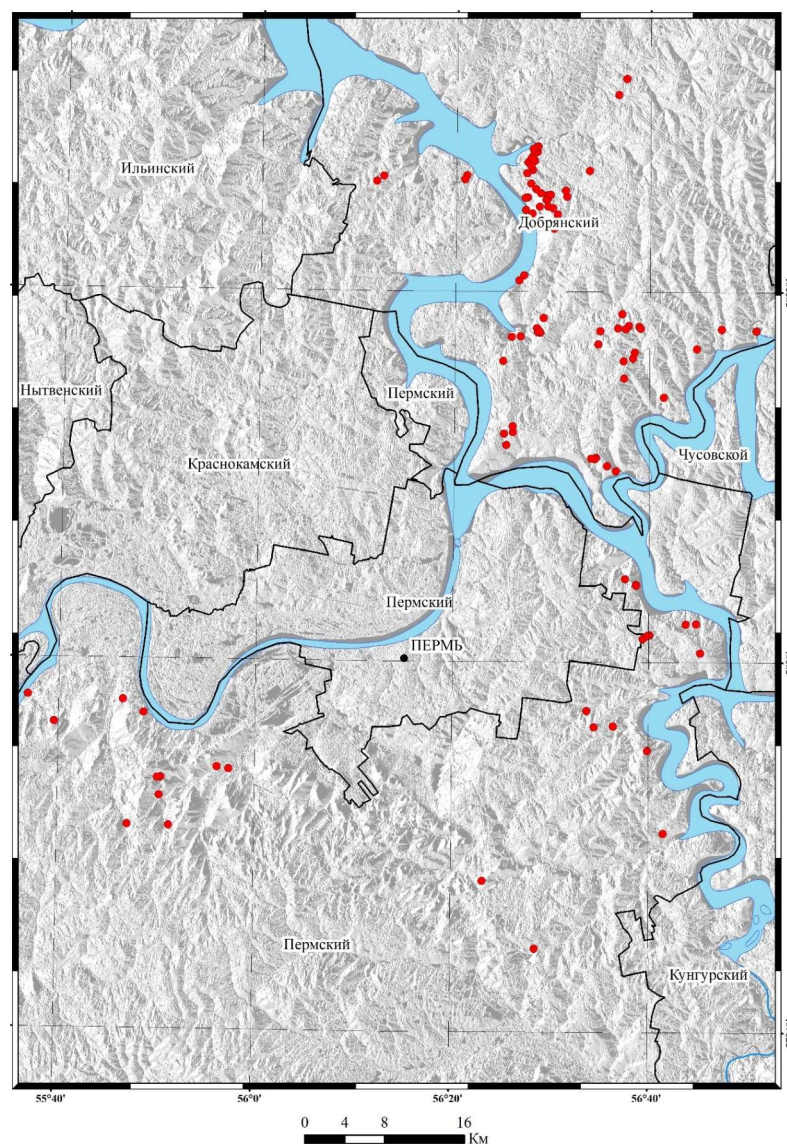


Рисунок 1. Карта-схема расположения обследованных лесных участков

Figure 1. The map-scheme of the location of surveyed forest areas

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Таблица 2

Основные таксационные характеристики древостоев пробных площадей

Table 2

The main taxation characteristics of forest stands in the sample areas

Таксационные показатели The taxational data	Статистические показатели The statistical data					
	Среднее Average	Стандартная ошибка Standard error	Максимум Maximum	Минимум Minimum	Медиана Median	Мода Mode
Тип леса – ельник зеленомошный (Е.зм.), объем выборки – 7 The type of forest - green moss spruce forest, sample volume – 7						
Количество реласкопических площадок, шт. The number of relascopic plots, pcs	13	2,18	22	4	12	11
Средний возраст, лет The average age, year	101	5,08	120	90	100	90
Полнота Density	0,5	0,03	0,58	0,36	0,52	-
Тип леса – ельник кисличный (Е.к.), объем выборки – 31 The type of forest – Sorrel spruce forest, sample volume – 31						
Количество реласкопических площадок, шт. The number of relascopic plots, pcs	11	0,84	25	4	11	6
Средний возраст, лет The average age, year	99	3,25	140	60	100	100
Полнота Density	0,49	0,02	0,82	0,23	0,49	0,44
Тип леса – ельник липовый (Е.лп.), объем выборки – 42 The type of forest – linden spruce forest, sample volume – 42						
Количество реласкопических площадок, шт. The number of relascopic plots, pcs	11	0,74	22	5	11	8
Средний возраст, лет The average age, year	97	3,62	140	60	95	100
Полнота Density	0,63	0,03	0,99	0,2	0,63	0,61
Тип леса – ельник широколиственный (Е.тр.), объем выборки – 32 The type of forest – broad-grass spruce forest, sample volume – 32						
Количество реласкопических площадок, шт. The number of relascopic plots, pcs	9	0,60	17	4	9	6
Средний возраст, лет The average age, year	97	3,57	140	75	87,5	80
Полнота Density	0,43	0,02	0,72	0,05	0,41	0,4
Общая выборка, объем – 112 Total sample, volume – 112						
Количество реласкопических площадок, шт. The number of relascopic plots, pcs	11	0,43	25	4	10	6
Средний возраст, лет The average age, year	98	1,91	140	60	95	100
Полнота Density	0,53	0,02	0,99	0,05	0,49	0,49

Источник: собственные вычисления авторов

Source: calculations of the authors

Результаты

Значения средневзвешенных баллов санитарного состояния пихтовых древостоев, произрастающих на территории исследованных насаждений, представлены на рис. 2.

Согласно материалам графиков боксплот, средневзвешенный балл санитарного состояния древостоев

пихты, заселенных уссурийским полиграфом, варьирует от 1,53 (ослабленные древостои) до 5,0 (погибшие древостои). Максимальный средневзвешенный балл санитарного состояния, имеющий значение 5,0, зафиксирован у пихтовых древостоев, произрастающих в ельниках липовом и широколиственном.

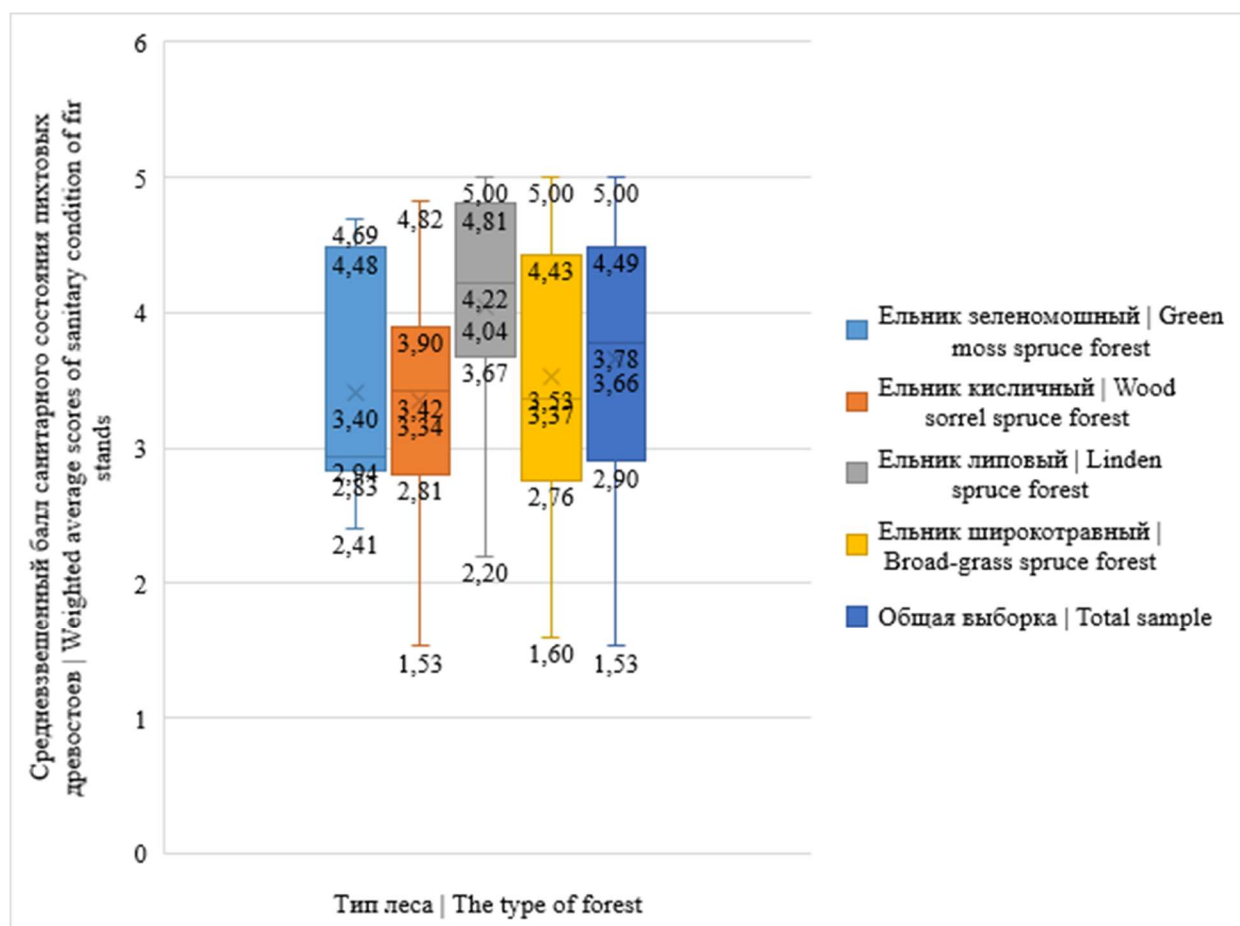


Рисунок 2. Значения средневзвешенных баллов санитарного состояния пихтовых древостоев, произрастающих в насаждениях разных типов леса и заселенных уссурийским полиграфом

Figure 2. The values of the weighted average scores of the sanitary condition of fir stands growing in plantings of different types of forest and inhabited by the *P. proximus*

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Указанный средневзвешенный балл санитарного состояния свидетельствует о полной гибели пихтового древостоя. Таким образом, полностью погибшие пихтовые древостои в насаждениях зеленомошного и кисличного типов леса не отмечены.

Оценка санитарного состояния пихтовых древостоев представлена на рис. 3.

Согласно материалам рис. 3, в районе исследований преобладают усыхающие древостои пихты, их доля от общей площади обследованных насаждений со-

ставляет 36%. Более 25% занимают лесные насаждения, древостои пихты которых характеризуются сильно ослабленным состоянием. Доля погибших превышает 21%. Наименьшую долю занимают насаждения с ослабленным состоянием пихтовых древостоев (16,8%). Факт незначительной доли ослабленных и отсутствия пихтовых древостоев с категорией санитарного состояния «без признаков ослабления» свидетельствует о неудовлетворительном санитарном состоянии пихтовых древостоев, произрастающих в районе исследования.

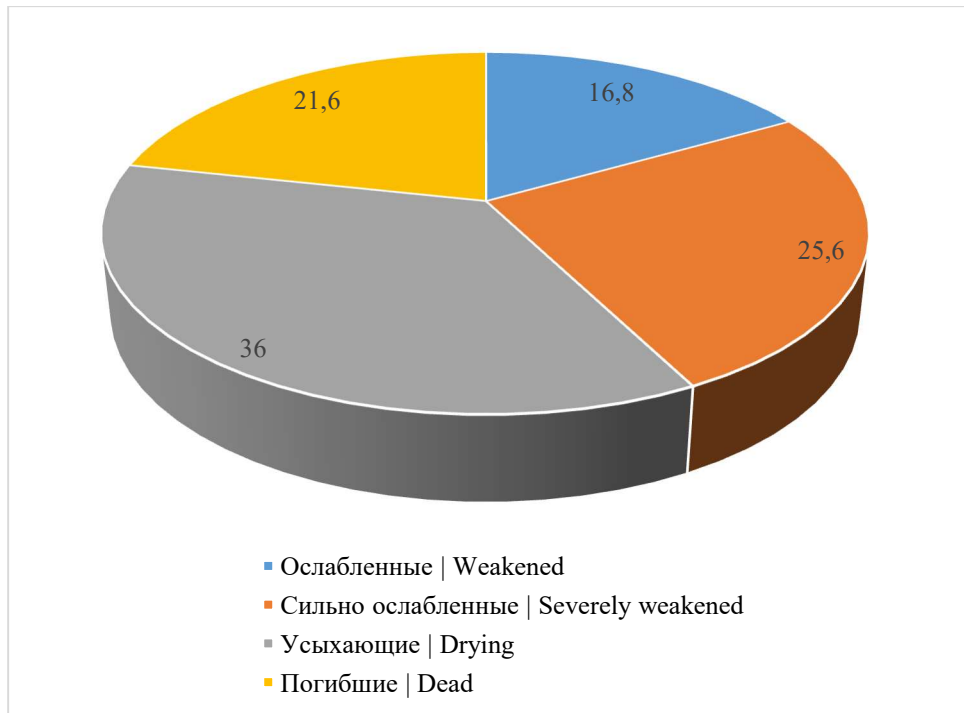


Рисунок 3. Распределение площади обследованных насаждений по категориям санитарного состояния пихтовых древостоев, %

Figure 3. The distribution of the area of the surveyed plantations by categories of sanitary condition of fir stands, %

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Запас живой части пихтового древостоя после повреждения уссурийским полиграфом варьирует от 0 до 97,14%, причем максимальная доля живых деревьев зафиксирована в насаждении широколиственного типа леса (табл. 2). В среднем доля живых деревьев в насаждениях большинства типов леса колеблется в пределах 41,27-44,31%. В насаждениях ельника липового доля живых деревьев в среднем намного меньше и составляет 26,74%. Следует отметить, что наиболее часто встречаются насаждения, в которых живые деревья пихты после воздействия инвайдера отсутствуют. То есть пихтовый древостой часто погибает полностью.

Доля погибших деревьев пихты в результате заселения насаждения уссурийским полиграфом варьирует от 2,86 до 100%, причем полная гибель древостоев пихты зафиксирована в насаждениях липового

и широколиственного типов леса. Полностью погибшие древостои наиболее часто встречаются в насаждениях липового типа леса.

В среднем в насаждениях всех типов леса доля погибших деревьев пихты превышает долю живых. В ельниках липовых доля погибших деревьев превосходит долю живых в среднем в 2,5 раза!

Доля захламленности от общего запаса пихтового древостоя не превышает 39,21%. При этом в насаждениях всех типов леса преобладают выделы с полным отсутствием захламленности. В среднем от ветровала и бурелома пихты наиболее захламлены ельники кисличные.

Доля участия пихты в составе древостоев до усыхания варьировала от 5-10 до 30-60% в зависимости от типа леса (табл. 3).

Таблица 2
Статистические показатели запасов живых, погибших деревьев пихты и захламленности в насаждениях разных типов леса

Table 2

The statistical indicators of stocks of living, dead fir trees and clutter in plantations of different types of forest

Состояние деревьев The condition of trees	Статистические показатели The statistical data					
	Среднее Average	Стандартная ошибка Standard error	Максимум Maximum	Минимум Minimum	Медиана Median	Мода Mode
Тип леса – ельник зеленомошный, объем выборки – 7 The type of forest - green moss spruce forest, sample volume – 7						
Доля живых деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of living trees in the total stock of fir forest stand, %	44,3	10,0	78,0	8,3	52,2	-
Доля погибших деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of dead trees in the total stock of fir forest stand, %	49,4	9,6	80,0	13,3	43,5	-
Захламленность, % Debris-strewn, %	6,2	2,2	18,1	0	4,4	-
Тип леса – ельник кисличный, объем выборки – 31 The type of forest – Sorrel spruce forest, sample volume – 31						
Доля живых деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of living trees in the total stock of fir forest stand, %	43,2	5,0	93,3	0	39,2	0
Доля погибших деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of dead trees in the total stock of fir forest stand, %	46,2	4,5	97,5	6,7	50,0	51,4
Захламленность, % Debris-strewn, %	9,0	1,8	39,2	0	6,2	0
Тип леса – ельник липовый, объем выборки – 42 The type of forest – linden spruce forest, sample volume – 42						
Доля живых деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of living trees in the total stock of fir forest stand, %	26,7	3,9	78,4	0	25,2	0
Доля погибших деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of dead trees in the total stock of fir forest stand, %	66,4	4,2	100,0	15,0	67,8	100
Захламленность, % Debris-strewn, %	6,8	0,8	19,9	0	6,2	0
Тип леса – ельник широколиственный, объем выборки – 32 The type of forest – broad-grass spruce forest, sample volume – 32						
Доля живых деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of living trees in the total stock of fir forest stand, %	41,3	4,8	97,1	0	42,7	-
Доля погибших деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of dead trees in the total stock of fir forest stand, %	52,7	4,8	100,0	2,9	49,6	75,0
Захламленность, % Debris-strewn, %	6,7	1,5	28,6	0	3,4	0
Общая выборка, объем выборки – 112 Total sample, volume – 112						
Доля живых деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of living trees in the total stock of fir forest stand, %	36,6	2,6	97,1	0	34,3	0

Доля погибших деревьев от общего запаса пихтового древостоя, % The share of dead trees in the total stock of fir forest stand, %	55,7	2,6	100,0	2,9	55,1	100
Захламленность, % Debris-strewn, %	7,3	0,7	39,2	0	5,9	0

Источник: собственные вычисления авторов

Source: calculations of the authors

Таблица 3

Статистические показатели доли участия пихтовых древостоев в породном составе лесных насаждений до усыхания и после усыхания в результате воздействия уссурийского полиграфа

Table 3

The statistical indicators of the share of fir stands in the species composition of forest plantations before and after drying out as a result of exposure to the *P. proximus*

Исследуемые показатели доли участия пихтовых древостоев в породном составе насаждения The studied indicators of the share of fir stands in the species composition of the plantation	Статистические показатели The statistical data					
	Среднее Average	Стандартная ошибка Standard error	Максимум Maximum	Минимум Minimum	Медиана Median	Мода Mode
Тип леса – ельник зеленомошный The type of forest - green moss spruce forest						
Доля древостоев пихты в составе насаждения до усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation until drying out, %	21,4	3,4	30	10	20	30
Доля древостоев пихты в составе насаждения после усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation after drying out, %	11,4	3,0	20	5	5	5
Доля, на которую сократилось участие пихты в составе насаждения после усыхания, % The share by which the participation of fir in the composition of the plantation decreased after drying out, %	10,0	1,5	15	5	10	10
Тип леса – ельник кисличный The type of forest – Sorrel spruce forest						
Доля древостоев пихты в составе насаждения до усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation until drying out, %	21,6	2,2	50	5	20	20
Доля древостоев пихты в составе насаждения после усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation after drying out, %	9,7	1,5	40	0	10	10
Доля, на которую сократилось участие пихты в составе насаждения после усыхания, % The share by which the participation of fir in the composition of the plantation decreased after drying out, %	11,9	1,6	40	0	10	10
Тип леса – ельник липовый The type of forest – linden spruce forest						
Доля древостоев пихты в составе насаждения до усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation until drying out, %	12,1	2,0	60	5	10	5

Доля древостоев пихты в составе насаждения после усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation after drying out, %	4,6	0,7	20	0	5	0
Доля, на которую сократилось участие пихты в составе насаждения после усыхания, % The share by which the participation of fir in the composition of the plantation decreased after drying out, %	7,5	1,9	60	0	5	5
Тип леса – ельник широколиственный The type of forest – broad-leaf spruce forest						
Доля древостоев пихты в составе насаждения до усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation until drying out, %	20,0	2,3	60	5	20	20
Доля древостоев пихты в составе насаждения после усыхания, % The share of fir stands in the composition of the plantation after drying out, %	10,2	1,6	40	0	7,5	5
Доля, на которую сократилось участие пихты в составе насаждения после усыхания, % The share by which the participation of fir in the composition of the plantation decreased after drying out, %	9,8	1,3	30	0	10	5

Источник: собственные вычисления авторов
Source: calculations of the authors

Проведенный анализ свидетельствует о значительном снижении роли пихты в составе древостоев после усыхания, вызванного воздействием патогена *P. proximus*. В исходном состоянии доля участия пихты варьировала в зависимости от типа лесорастительных условий: максимальные показатели (20-30%) отмечались в ельниках кисличных, широколиственных и зеленомошных, тогда как в ельниках липовых её участие не превышало 5%.

После патогенного воздействия наблюдается существенное сокращение фитоценотической роли пихты. В среднем, её участие в составе древостоев уменьшилось на одну единицу (10%) в формуле породного состава. Наиболее значительное снижение

(на 60%) зафиксировано в ельниках липовых. В текущем состоянии доля жизнеспособных особей пихты не превышает 5-10% в большинстве типов леса, достигая 20-40% лишь в отдельных лесных ассоциациях.

Полученные данные демонстрируют дифференцированную устойчивость пихты в различных типах лесных экосистем, что свидетельствует о необходимости учета лесорастительных условий при разработке мер по сохранению и восстановлению данного вида.

Полная гибель пихтовых древостоев отмечена в 21,4% случаев (табл. 4).

Таблица 4
Доля полностью погибших пихтовых древостоев в насаждениях разных типов леса
Table 4
The proportion of completely dead fir stands in plantations of different types of forest

Тип леса The type of forest	Количество обследованных насаждений, шт. The number of surveyed plantations, pcs.	Количество полностью погибших пихтовых древостоев, шт. The number of completely dead fir stands, pcs.	Доля полностью погибших пихтовых древостоев, % The share of completely dead fir stands, pcs.
Е.зм. Green moss spruce forest	7	0	0
Е.к. Sorrel spruce forest	31	3	2,7

Е.лп. Linden spruce forest	42	16	14,2
Е.тр. Broad-grass spruce forest	32	5	4,5
Итого Total	112	24	21,4

Источник: собственные вычисления авторов
Source: calculations of the authors

Наибольшая доля полной гибели древостоев пихты (*Abies sibirica* Ledeb.) зарегистрирована в условиях липового типа леса, достигая 14,2% от общей площади изученных насаждений. Выдвигается гипотеза, что повышенная уязвимость пихты в данном типе лесорастительных условий обусловлена её низкой исходной долей участия в составе древостоя. Так, в зеленомошных, кисличных и широколиственных типах леса доля пихты в среднем составляла 2 единицы в формуле состава, тогда как в липовых ельниках — не более 1 единицы, что свидетельствует о маргинальном положении вида в данных фитоценозах.

Установлена статистически достоверная обратная корреляционная зависимость ($p < 0,05$) между исходной долей участия пихты в составе древостоя и интенсивностью её усыхания под воздействием патогена *Pityokteines proximus* Blandf. (табл. 5). Полученные данные подтверждают, что степень доминирования вида в фитоценозе является значимым фактором, влияющим на устойчивость древостоев к патогенной нагрузке. Более низкая конкурентная способность пихты в липовых типах леса, вероятно,

обусловлена её угнетённым состоянием в условиях сложной ценотической структуры и ограниченной доступности ресурсов, что повышает предрасположенность к поражению стволовыми вредителями. Это указывает на необходимость учёта породной структуры и ценотического статуса вида при оценке рисков массового усыхания пихтовых насаждений и разработке защитных мероприятий.

Значимая корреляционная зависимость доли участия пихты в составе древостоев до усыхания с долей погибших деревьев после воздействия *P. proximus* имеет отрицательную направленность, а с долей живых деревьев — положительную.

Обсуждение

Таким образом, выдвинутая авторами гипотеза подтвердилась: повреждение деревьев пихты уссурийским полиграфом, произрастающих в Южно-таежном районе европейской части Российской Федерации Пермского края, приводит к значительному сокращению запаса пихтовых древостоев, а также в ряде случаев к исчезновению породы из состава лесных насаждений.

Таблица 5

Статистически значимые корреляции между долей участия пихты в составе древостоев до усыхания и состоянием деревьев после воздействия *P. proximus* (при p -значении = 0,05)

Table 5

The statistically significant correlations between the proportion of fir in the composition of forest stands before drying out and the condition of trees after the impact of *P. proximus* (at p -value = 0.05)

Тип леса The type of forest	Корреляционная зависимость между долей участия пихты в составе древостоев до усыхания и санитарным состоянием деревьев пихты после воздействия <i>P. proximus</i> The correlation between the proportion of fir in the composition of forest stands before drying out and the sanitary condition of fir trees after exposure to <i>P. proximus</i>		
	Коэффициент корреляции Спирмена Spearman's rank correlation coefficient		Сила связи по шкале Чеддока The strength of bonding on the Cheddock scale
	Доля живых деревьев The share of living trees	Доля погибших деревьев The share of dead trees	
Е.зм. Green moss spruce forest	0,7111	-0,5988	Высокая и средняя соответственно
Е.к. Sorrel spruce forest	0,0394	-0,0801	Очень слабая

Е.лп. Linden spruce forest	0,5177	-0,5474	Средняя
Е.тр. Broad-grass spruce forest	0,5162	-0,4606	Средняя и слабая соответственно
Итого Total	0,3867	-0,4035	Слабая

Источник: собственные вычисления авторов

Source: calculations of the authors

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют, что с увеличением доли участия пихты в составе древостоев до усыхания доля погибших деревьев пихты в результате повреждения уссурийским полиграфом уменьшается. В смешанных насаждениях, в которых небольшой запас породы деревьев, служащих источником питания, наблюдается высокая вероятность полного заселения древостоя вредителем.

Исследованиями других авторов подтверждается высокая степень гибели пихты от воздействия уссурийского полиграфа. В границах Закрытого административно-территориального образования Железногорск в 2020 году доля погибших деревьев породы пихта в результате заселения опасного вредителя достигала 86% [9]. В Красноярском крае доля запаса сухостоя пихты в очагах массового размножения *P. proximus* достигает 77-100% [2, 7].

Результаты данного исследования могут быть использованы при установлении последствий воздействия уссурийского полиграфа, при расчете экономического ущерба государству, при прогнозировании изменения таксационных показателей насаждений с участием пихтовых древостоев в результате их повреждения *P. proximus*.

В дальнейшем авторами планируется рассмотреть влияние таксационных показателей на устойчивость деревьев пихты к воздействию *P. proximus*. Будет рассмотрено влияние полноты древостоев, влияние породного состава насаждений, проведено сравнение диаметров и форм поперечных сечений стволов деревьев пихты разных категорий санитарного состояния, а также сравнение показателей крон живых деревьев пихты и свежего сухостоя.

Установление влияния таксационных характеристик на устойчивость древостоев пихты к повреждению уссурийским полиграфом позволит разработать рекомендации по борьбе с вредителем лесоводственными способами.

Заключение

В результате анализа материалов лесопатологического обследования, проведенного на территории Пермского и Добрянского лесничеств Пермского края, установлено, что повреждение деревьев пихты уссурийским полиграфом, произрастающих в Южно-таежном районе европейской части Российской Федерации Пермского края, приводит к значительному сокращению запаса пихтовых древостоев, а также в ряде случаев к исчезновению породы из состава лесных насаждений. Высокая степень гибели пихты от воздействия уссурийского полиграфа подтверждается исследованиями других ученых. В среднем в насаждениях всех типов леса после воздействия *P. proximus* доля запаса погибших деревьев пихты превышает долю запаса живых, а участие пихты в формуле состава древостоев в результате усыхания сокращается на 1 единицу. В ельниках липовых доля погибших деревьев превосходит долю живых в среднем в 2,5 раза! Полная гибель пихтовых древостоев отмечена в 21,4% случаев, причем наибольшая доля полностью погибших древостоев пихты зафиксирована в насаждениях липового типа леса (14,2%). По мнению авторов, высокая гибель деревьев пихты в условиях липового типа леса объясняется невысокой долей участия пихтовых древостоев в породном составе насаждений указанного типа леса: в среднем в насаждениях зеленомошного, кисличного и широколиственного типов леса участие пихты до усыхания составляло 2 единицы в формуле состава древостоев, а в насаждениях ельника липового – всего 1 единицу. Между долей участия пихты в составе древостоев до усыхания и санитарным состоянием деревьев в результате воздействия *P. proximus* установлена статистически значимая корреляционная зависимость. Обратная корреляционная связь выявлена между долей участия пихты в составе древостоев и долей погибших от воздействия *P. proximus* деревьев.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы при установлении последствий воздействия уссурийского полиграфа, при расчете эко-

номического ущерба государству и при прогнозировании изменения таксационных показателей насаждений с участием пихтовых древостоев в результате их повреждения *P. proximus*.

Список литературы

1. Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа. Медицинский альманах. 2021; 3(68): 70-79. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46594535&ysclid=m8ngdgy2tw281472022>
2. Бакшеева Е.О., Головина А.Н., Морозов С.А. Лесовозобновление и пожароопасность пихтовых насаждений, поврежденных полиграфом уссурийским. Хвойные бореальной зоны. 2021; 39(6): 443-450. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48036123&ysclid=m8nj4v8g85407098484>
3. Бисирова Э.М., Кривец С.А., Черногринов П.Н. Распространение и популяционные характеристики уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* на севере Томской области. Известия Санкт-петербургской лесотехнической академии. 2023; 244: 7-25. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.244.7-25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54476734>
4. Бутока С.В., Скрыпник Л.Н. Санитарное и лесопатологическое состояние хвойно-широколиственных (смешанных) лесов Калининградской области. Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2023; 27(2): 59-66. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-59-66. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50510764&ysclid=m8mqh2wgik560026554>
5. Гниненко Ю.И., Ширяева Н.В. Инвайдеры и особо охраняемые природные территории: почему не званый гость хуже? Сибирский лесной журнал. 2023; 5: 23-31. DOI: 10.15372/SJFS20230505. Режим доступа: <https://сибирскийлеснойжурнал.рф/articles/archive/arkhiv-2023-g/gninenko-yu-i-shiryayeva-n-v-invaydery-i-osobo-okhranyaemye-prirodnye-territorii-pochemu-nezvanyy-gos/>
6. Дедюхин С.В., Титова В.В. Обнаружение уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Удмуртии. Российский журнал биологических инвазий. 2021; 14(2): 32-39. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-2-32-39. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46123466&ysclid=m8njctcvwk228698804>
7. Жила С.В., Фуряев И.В., Ковалева Н.М. Оценка запасов лесных горючих материалов в поврежденных полиграфом уссурийским пихтовых древостоях Красноярского края. Сибирский лесной журнал. 2023; 6: 76-84. DOI: 10.15372/SJFS20230608. Режим доступа: <https://сибирскийлеснойжурнал.рф/articles/archive/arkhiv-2023-g/zhila-s-v-i-v-furyayev-kovaleva-n-m-otsenka-zapasov-lesnykh-goryuchikh-materialov-v-povrezhdennykh-po/>
8. Исаева И.Л. О находке полиграфа уссурийского – *Polygraphus proximus* Blandford. на территории кластерного участка «Малый Абакан» заповедника «Хакасский» и прилегающих территориях. Мониторинг состояния природных комплексов и многолетние исследования на особо охраняемых природных территориях. 2021; 5: 100-102. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47953748&ysclid=m8njfcfljt289345789>
9. Коваль Ю.Н. Полиграф уссурийский и его влияние на лесопатологическую обстановку ЗАТО Железнодорожск. Биосферное хозяйство: теория и практика. 2020; 7(25): 90-96. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43792789&ysclid=m8nhmhr075819704728>
10. 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.Р., Пономарёв В.И., Потапкин А.Б., Тараскин Е.Г., Титова В.В., Шилоносков А.О., Баранчиков Ю.Н. Обзор современного вторичного ареала уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации. Российский журнал биологических инвазий. 2024; 1: 49-69. DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=60974001&ysclid=m8njiwotpz343896542>

11. Мартирова М.Б., Мамаев Н.А., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г., Пахучий В.В., Пахучая Л.М., Селиховкин А.В. Пространственная динамика состояния и комплексов болезней и вредителей таежных лесов северо-запада европейской части России. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024; 251: 17-44. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.17-44>. Режим доступа: <https://izvestiya-lta.spbftu.ru/jour/article/view/416/355>
12. Об утверждении Лесоустроительной инструкции: утверждена приказом Минприроды России от 5 августа 2022 года № 510. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/351878696?ysclid=m8oode1zue464220075>
13. Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации: утвержден приказом Минприроды России от 18 августа 2014 года № 367. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420224339?ysclid=m8ooethoh1241871336>
14. Об утверждении Порядка отвода и таксации лесосек и о внесении изменений в Правила заготовки древесины и особенности заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации, утвержденные приказом Минприроды России от 1 декабря 2020 г. № 993: утвержден приказом Минприроды России от 17 октября 2022 года № 688. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/352246458?ysclid=m8oogvbm22578359536>
15. Об утверждении Порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологического обследования: утвержден приказом Минприроды России от 9 ноября 2020 года № 910. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573140196?ysclid=m8ooivotvn904118509>
16. Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах: утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 года № 2047. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573053313?ysclid=m8ookkev6y429816047>
17. Селиховкин А.В. Нормативно-правовая база лесозащиты и ее результативность в регуляции плотности популяций вредителей в таежных лесах. Сибирский лесной журнал. 2023; 1: 29–42. DOI: 10.15372/SJFS20230104. Режим доступа: <https://сибирскийлеснойжурнал.pf/articles/archive/arkhiv-2023-g/selikhovkin-a-v-normativno-pravovaya-baza-lesozashchity-i-eye-rezultativnost-v-regulyatsii-plotnosti/>
18. Constandache C., Tudor C., Aga V., Popovici L. Ecological restoration of Norway spruce stands affected by drying from outside the natural range. Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering. 2024; Vol. XIII: 60-66. Available from: <https://landreclamationjournal.usamv.ro/index.php/scientific-papers/current?id=642>
19. Forzieri G., Dakos V., McDowell N.G., Alkama R., Cescatti A. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. Nature. 2022; 608(7923): 534–539. DOI: 10.1038/s41586-022-05071-9. Available from: https://www.researchgate.net/publication/361973274_Emerging_signals_of_declining_forest_resilience_under_climate_change
20. 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(3): 1-28. DOI:10.1007/s40725-021-00142-x. Available from: https://www.researchgate.net/publication/353546784_Bark_Beetle_Outbreaks_in_Europe_State_of_Knowledge_and_Ways_Forward_for_Management
21. 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 Ecol. Biogeogr. 2021; 30(2): 543–556. DOI: 10.1111/geb.13243. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45065907>
22. Löwe, R.; Sedlecký, M.; Sikora, A.; Prok^o upková, A.; Modlinger, R.; Novotný, K.; Turčáni, M. How Bark Beetle Attack Changes the Tensile and Compressive Strength of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Forests 2022, 13, 87. <https://doi.org/10.3390/f13010087>. Available from: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/1/87>

23. 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. Available from: <https://doi.org/10.1111/afe.12536>

24. Patacca M., Lindner M., Lucas-Borja M.E. et al. Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*. 2023; 29(5): 1359–1376. DOI:10.1111/gcb.16531. Available from: https://www.researchgate.net/publication/366193141_Significant_increase_in_natural_disturbance_impacts_on_Euro-pean_forests_since_1950

References

1. Bavrina A.P., Borisov I.B. Sovremennye pravila primeneniya korrelyatsionnogo analiza. [Modern rules of the application of correlation analysis]. *Meditinskiy al'manakh*. [Medical almanac]. 2021; 3(68): 70-79. (In Russ.).

2. Baksheeva E.O., Golovina A.N., Morozov S.A. Lesovozobnovlenie i pozharoopasnost' pikhtovykh nasazhdeniy, povrezhdennykh poligrafom ussuriyskim. [Reforestation and fire hazard of fir stands damaged by the polygraphus proximus]. *Khvoynye boreal'noy zony*. [Conifers of the boreal area]. 2021; 39(6): 443–450. (In Russ.).

3. Bisirova E.M., Krivets S.A., Chernogrivov P.N. Rasprostranenie i populyatsionnye kharakteristiki ussuriyskogo poligrafa *Polygraphus proximus* na severe Tomskoy oblasti. [Distribution and population characteristics of the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* in the north of the Tomsk oblast]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2023; 244: 7-25. (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.244.7-25.

4. Butoka S.V., Skrypnik L.N. Sanitarnoe i lesopatologicheskoe sostoyanie khvoyno-shirokolistvennykh (smeshannykh) lesov Kaliningradskoy oblasti. [Sanitary and forest pathology state of coniferous-broad-leaved (mixed) stands in Kaliningrad region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2023; 27(2): 59–66. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-59-66.

5. Gninenko Yu.I., Shiryayeva N.V. Invaydery i osobo okhranyaemye prirodnye territorii: pochemu ne zvanyy gost' khuzhe? [Invaders and specially protected natural areas: why is an intruder worse?]. *Sibirskiy Lesnoj Zurnal [Sib. J. For. Sci.]*. 2023; 5: 23–31. (In Russ.). DOI: 10.15372/SJFS20230505.

6. Dedyukhin S.V., Titova V.V. Obnaruzhenie ussuriyskogo poligrafa (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) v Udmurtii. [Finding of the bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Udmurtia]. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii*. [Russian Journal of Biological Invasions]. 2021; 14(2): 32-39. (In Russ.). DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-2-32-39.

7. Zhila S.V., Furyaev I.V., Kovaleva N.M. Otsenka zapasov lesnykh goryuchikh materialov v povrezhdennykh poligrafom ussuriyskim pikhtovykh drevostoyakh Krasnoyarskogo kraya. [Assessment of stocks of forest combustible materials in fir stands, damaged by the four-eyed fir bark beetle in Krasnoyarsk krai]. *Sibirskiy Lesnoj Zurnal [Sib. J. For. Sci.]*. 2023; 6: 76–84. (In Russ.). DOI: 10.15372/SJFS20230608.

8. Isaeva I.L. O nakhodke poligrafa ussuriyskogo – *Polygraphus proximus* Blandford. na territorii klasterного uchastka «Malyi Abakan» zapovednika «Khakasskii» i prilegayushchikh territoriyakh. [About the discovery of the Ussuri polygraph – *Polygraphus proximus* Blandford. on the territory of the cluster site «Maly Abakan» of the «Khakassky» nature reserve and adjacent territories.]. *Monitoring sostoyaniya prirodnnykh kompleksov i mnogoletnie issledovaniya na osobo okhranyaemykh prirodnnykh territoriyakh*. 2021; 5: 100-102. (In Russ.).

9. Koval Yu.N. Poligraf ussuriyskii i ego vliyanie na lesopatologicheskuyu obstanovku ZATO Zheleznogorsk. [Polygraph Ussuri and its influence on forestpathological situation ZATO Zheleznogorsk]. *Biosfernoe khozyaistvo: teoriya i praktika*. 2020; 7(25): 90-96. (In Russ.).

10. Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Astapenko S.A., Efremenko A.A., Kosilov A.Yu., Kudryavtsev P.P., Kuznetzova Yu.P., Ponomarev V.I., Potapkin A.B., Taraskin E.G., Titova V.V., Shilonosov A.O., Baranchikov Yu.N. Obzor sovremennogo vtorichnogo areala ussuriyskogo poligrafa (*Polygraphus Proximus* Blandford) na territorii Rossiyskoy Federatsii [Overview of the current secondary range of the Four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in the Russian Federation]. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions]. 2024; 1: 49–69. (In Russ.). DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69.

11. Martirova M.B., Mamaev N.A., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G., Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M., Selikhovkin A.V. Prostranstvennaya dinamika sostoyaniya i kompleksov boleznei i vreditel' taezhnykh lesov severo-zapada evropeiskoi chasti Rossii. [Spatial dynamics of the state and complexes of diseases and pests of taiga forests in the north-west of the European part of Russia]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2024; 251: 17-44. (in Russian with English summary). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.17-44>.
12. Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noi instruktsii [On approval of the Forest Management Instructions]: utverzhdena prikazom Minprirody Rossii [approved by order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation] on August 5, 2022 No. 510. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696?ysclid=m8oodc1zue464220075>
13. Ob utverzhdenii Perechnya lesorastitel'nykh zon Rossiiskoi Federatsii i Perechnya lesnykh raionov Rossiiskoi Federatsii [On approval of the List of forest vegetation zones of the Russian Federation and the List of forest regions of the Russian Federation] : utverzhden prikazom Minprirody Rossii [approved by order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation] on August 18, 2014 No. 367. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420224339?ysclid=m8ooethoh1241871336>
14. Ob utverzhdenii Poryadka otvoda i taksatsii lesosek i o vnesenii izmenenii v Pravila zagotovki drevesiny i osobennosti zagotovki drevesiny v lesnichestvakh, ukazannykh v stat'e 23 Lesnogo kodeksa Rossiiskoi Federatsii, utverzhdennye prikazom Minprirody Rossii ot 1 dekabrya 2020 goda № 993 [On approval of the Procedure for the allocation and taxation of felling areas and on amendments to the Rules for timber harvesting and the specifics of timber harvesting in forestries specified in Article 23 of the Forest Code of the Russian Federation, approved by order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated December 1, 2020 No. 993] : utverzhden prikazom Minprirody Rossii [approved by order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation] on October 17, 2022 No. 688. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/352246458?ysclid=m8oogvbm22578359536>
15. Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya lesopatologicheskikh obsledovaniy i formy akta lesopatologicheskogo obsledovaniya [On approval of the Procedure for conducting forest pathology surveys and the form of the forest pathology survey report] : utverzhden prikazom Minprirody Rossii [approved by order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation] on November 9, 2020 No. 910. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140196?ysclid=m8ooivotvn904118509>
16. Ob utverzhdenii Pravil sanitarnoy bezopasnosti v lesakh [On approval of Regulations of sanitary Safety] : utverzhdeny Postanovleniem Pravitel'stva RF [approved by the RF Government Decree] on December 9, 2020 No. 2047. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_370645/0b3dfd4779a800d94c98bb0d44cd53e1dae94450/?ysclid=m3pjix3xsh627809010
17. Selikhovkin A.V. Normativno-pravovaya baza lesozashchity i ee rezul'tativnost' v regulyatsii plotnosti populyatsii vreditel' v taezhnykh lesakh. [Normative-legal basis of forest protection and its efficiency in regulation of pest population density in taiga forests]. *Sibirskiy Lesnoj Zhurnal [Sib. J. For. Sci.]*. 2023; 1: 29–42. (In Russ.). DOI: 10.15372/SJFS20230104.
18. Constandache C., Tudor C., Aga V., Popovici L. Ecological restoration of Norway spruce stands affected by drying from outside the natural range. *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*. 2024; Vol. XIII: 60-66.
19. Forzieri G., Dakos V., McDowell N.G., Alkama R., Cescatti A. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*. 2022; 608(7923): 534–539. DOI: 10.1038/s41586-022-05071-9.
20. 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(3): 1-28. DOI:10.1007/s40725-021-00142-x.
21. 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 Ecol. Biogeogr.* 2021; 30(2): 543–556. DOI: 10.1111/geb.13243.

22. Löwe, R.; Sedlecký, M.; Sikora, A.; Prok^o upková, A.; Modlinger, R.; Novotný, K.; Turčáni, M. How Bark Beetle Attack Changes the Tensile and Compressive Strength of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) H. Karst.). *Forests* 2022, 13, 87. <https://doi.org/10.3390/f13010087>.

23. 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.

24. Patacca M., Lindner M., Lucas-Borja M.E. et al. Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*. 2023; 29(5): 1359–1376. DOI: 10.1111/gcb.16531.

Сведения об авторах

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

Большаков Евгений Григорьевич – директор Пермского филиала ФГБУ «Рослесинфорг», г. Пермь, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9701-940X>, e-mail: b.e.g@mail.ru

Ротэрмель Эдуард Евгеньевич – лаборант лаборатории Устойчивого лесопользования Естественного научного института, студент географического факультета ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0238-9178>, e-mail: edvard_rotermel@mai.ru

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, Perm, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9476-8683>, e-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru

Evgeny G. Bolshakov – Director of Roslesinfor Federal State Budgetary Institution, Perm branch, Perm, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9701-940X>, e-mail: b.e.g@mail.ru

Eduard E. Rotermeil – Laboratory Assistant of the Laboratory of Sustainable forestry, Student, Faculty of Geography, Perm State University; Perm, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0238-9178>, e-mail: edvard_rotermel@mai.ru

✉ – Для контактов /Corresponding author



Реакция семенных потомств разных экотипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах на изменение климата

Мария И. Михайлова¹ ✉, schaxina.mary@yandex.ru, 0000-0003-4767-8233

Михаил П. Чернышов¹, lestaks53@mail.ru, 0000-0001-6360-1135

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

Рассмотрены отклики деревьев и древостоев лесостепных и степных экотипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на климатические изменения во взаимосвязи с их текущей сохраннылостью и санитарным состоянием. По радиальным кернам древесины, взятым в 62-летних семенных потомствах сосны разного географического происхождения у 96 модельных деревьев на 32 пробных площадях, установлены тренды изменения ширины годичных колец и их структура по календарным годам. На примере особо охраняемой природной территории (памятник природы «Ступинское поле» в Воронежской области), на которой не проводились активные хозяйственные мероприятия, влияющие на рост и санитарное состояние древостоев в течение их жизни, показаны величины и характер откликов радиального прироста деревьев разных экотипов сосны на изменения климата с дифференциацией трендов ширины колец по периодам роста. На основе статистической обработки экспериментальных данных измерений 96 кернов древесины выделено три возрастных периода изменения трендов роста по диаметру, а именно: увеличения ширины годичных колец, их уменьшения и стабилизации. От ширины годичных слоев древесины растущих деревьев по всей их высоте, а также от соотношения долей отложившейся ранней и поздней древесины зависят её физико-механические свойства (твёрдость, плотность, сопротивление на излом и др.). Ширина годичных слоев ранней древесины обусловлена как температурным режимом воздуха и почвы в целом за весенне-летний период вегетации, так и количеством выпадающих с разной интенсивностью и периодичностью осадков. Доказано, что тренды роста модельных деревьев в исследованных культурах лесостепных и степных экотипов сосны на 32 пробных площадях синхронно отражают потепление климата, но с различиями, обусловленными их внутривидовым и генетическим разнообразием.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, географические культуры, лесостепные и степные экотипы, ширина годичных колец, слои ранней и поздней древесины, отклик радиального прироста на изменения климата

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: Михайлова, М. И. Реакция семенных потомств разных экотипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах на изменение климата / М. И. Михайлова, М. П. Чернышов // Лесотехнический журнал. – 2025. . – Т. 15. – № 3 (59). – С. 55–67. – Библиогр.: с. 64–67 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/4>

Поступила 02.04.2025. Пересмотрена 03.09.2025. Принята 15.09.2025. Опубликована онлайн 25.09.2025.

Reaction of seed products of different scots pine ecotypes in geographical forest crops to climate change

Maria I. Mikhailova¹, ✉, schaxina.mary@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4767-8233>

Mikhail P. Chernyshov¹, lestaks53@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6360-1135>

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

Abstract

The responses of trees and stands of forest-steppe and steppe ecotypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to climatic changes in relation to their current conservation and sanitary condition are considered. According to radial wood cores taken in 62-year-old seed offspring of pines of different geographical origin from 96 model trees on 32 test areas, trends in the width of annual rings and their structure by calendar years have been established. Using the example of a specially protected natural territory (the Stupinskoye Field natural monument in the Voronezh Region), where no active economic measures were carried out that affect the growth and sanitary condition of stands during their lifetime, the magnitude and nature of the responses of radial growth of trees of different ecotypes of pine to climate changes with differentiation are shown. trends in ring widths by growth periods. Based on statistical processing of experimental data from measurements of 96 wood cores, three age periods of changes in growth trends in diameter have been identified, namely, an increase in the width of annual rings, their decrease and stabilization. Its physico-mechanical properties (hardness, density, fracture resistance, etc.) depend on the width of the annual wood layers of growing trees over their entire height, as well as on the ratio of the fractions of early and late wood that has broken off. The width of the annual layers of early wood is determined both by the temperature regime of the air and the soil as a whole during the spring and summer growing season, and by the amount of precipitation with varying intensity and frequency. It is proved that the growth trends of model trees in the studied cultures of forest-steppe and steppe ecotypes of pine on 32 test areas synchronously reflect climate warming, but with differences due to their intraspecific and genetic diversity.

Keywords: *Scots pine, geographical crops, forest-steppe and steppe ecotypes, the width of annual rings, layers of early and late wood, the response of radial growth to climate change*

Funding: This study did not receive external funding.

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

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

For citation: Mikhailova M. I., Chernyshov M. P. (2025). The reaction of seed progeny of different ecotypes of Scots pine in geographical forest crops to climate change. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 55-67 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/4>

Received 02.04.2025. *Revised* 03.09.2025. *Accepted* 15.09.2025. *Published online* 25.09.2025.

Введение

Конец XIX – начало XXI века совпали с эпохой повышения температур на нашей планете [1]. Долговременные отклонения климата в сторону повышения температуры и понижения влажности привели к смещению исторически сложившихся в ходе эволюционного процесса границ растительных зон и ландшафтов в северном направлении. Отдельные ученые [2] считают современный исторический период достаточно благоприятным для роста и развития лесной растительности.

Известно, что естественные экосистемы по сравнению с культивируемыми и чистыми по составу фитоценозами более пластичны и обладают более высоким уровнем видового, генетического, биологического и экологического разнообразия [3]. Кроме того, простые по форме моновидовые и культивируемые фитоценозы менее устойчивы к вредным организмам и резким изменениям условий внешней среды. Каждая экосистема и каждый входящий в неё биологический вид, равно как и семенные потомства их географических экотипов, перемещенные на разновеликие расстояния от материнских популяций, и произрастающие в иных и новых для них лесорастительных условиях, реагируют на повышение или температуры и понижение влажности в том или ином регионе по-разному. Однако реакция семенных потомств регионально и климатически разных экотипов сосны обыкновенной в географических лесных культурах на изменение климата до сих пор остается не изученной.

Обзор состояния проблемы

Известно, что все растущие деревья ежегодно формируют в течение вегетационного периода разновеликое по ширине годичное кольцо древесины, откладывающееся от камбия поверх поздней древесины годичного кольца предыдущего календарного года [5]. Годичные кольца древесины у хвойных и кольцесосудистых древесных пород состоят из двух отличающихся по плотности, цвету, структуре, анатомическому строению и, как правило, неравновеликих по ширине их составных частей – слоев ранней и поздней древесины [5, 6]. Ширина и структура древесины годичных колец во многом зависят от биологического возраста дерева, его

жизненного состояния, богатства условий местопроизрастания, занимаемого им положения в пологе древостоя и напряженности роста, площади питания, полноты и погодных условий в течение сезонов (весна, лето, осень) вегетационного периода того или иного календарного года и других факторов. Таким образом, именно годичные кольца древесных пород и их анатомическая структура являются надежным хранителем ценнейшей биоинформации о влиянии климата на рост деревьев и насаждений в течение минувших столетий [1, 4]. Реакция отдельных деревьев и древостоев семенных потомств сосны обыкновенной разных географических экотипов, собранных на одном полигоне географических лесных культур, созданном под руководством проф. М.М. Вересина в 1959 г., на изменения климата до сих пор остается не изученной. В связи с этим её выявление и оценка являлись целью исследований.

В ходе анализа литературы установлено, что проведенные ранее дендрохронологические исследования были посвящены вопросам поглощения лесами углекислого газа из атмосферы, депонированию углерода в древесине, эмиссии углекислого газа при лесных пожарах [1, 7]. Ряд научных статей посвящены изучению послепожарных сукцессий естественных лесов хвойных пород [8] и их восстановлению в разных регионах, а также динамике роста сохранившихся сильно-, средне- и слабоповрежденных лесных насаждений в изменившихся после ликвидации лесных пожаров лесорастительных условиях [9, 10]. Отдельные работы освещают организацию экологического мониторинга лесных экосистем, популяций, лесных насаждений и древостоев отдельных лесообразующих пород и полученные разными методами результаты [11]. Ряд публикаций посвящен ухудшению санитарного состояния лесных насаждений, влиянию на их рост техногенного загрязнения окружающей среды и нерегулируемой лесной рекреации [12]. В некоторых работах [13, 14] рассмотрены вопросы эволюционного развития лесов, биоиндикации и фиксации происходящих в них пространственных, структурных, качественных и количественных изменений с использованием методов дендрохронологии и статистического анализа ширины и структуры годичных колец. Окружающая среда и сомкнутый полог насаждений сглаживают

влияние кратковременных изменений погодных условий, и наоборот, продолжительные и обильные осадки, либо повышенные температуры оказывают прямое влияние на усиление или замедление роста лишь в последующие недели. Таким образом, явное проявление отклика слоев древесины наблюдается только при длительных и устойчивых изменениях погодных условий. Реже и в меньшей степени оказывают влияние на прирост климатические условия предыдущих лет [15]. Иногда кратковременная засуха в первой половине вегетационного периода вызывает формирование ложных слоев поздней древесины внутри слоя ранней древесины. Следует помнить, что по лесорастительному эффекту 10-15 мм осадков, разово выпавших в мае на влажную почву, не одно и то же, что 10-15 мм осадков, выпадающих в августе на сухую почву. То есть при равном количестве выпавших атмосферных осадков их лесорастительный эффект бывает разным. Поэтому количество выпадающих осадков играет первостепенную роль только в первой половине вегетационного периода, когда формируется слой ранней древесины, а не во второй его половине. Следовательно, важно учитывать не только количество выпадения осадков, но и фактор времени. Дело в том, что корневая система у сосны поверхностная и простирается преимущественно в верхнем 40-сантиметровом слое почвы, за исключением трех-пяти якорных и главного стрелкового корня, простирающихся вглубь до 1,0-1,5 м. Именно они снабжают деревья необходимой влагой для продолжения роста (рисунок 1).



Рисунок 1 – Поверхностная корневая система сосны обыкновенной на супесчаных почвах в типе леса свежая суборь (B₂), приводящая к ветровалу

Figure 1 – The surface root system of Scots pine on sandy loamy soils in the forest type fresh subor (B₂), leading to a windblow.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Подача влаги по трахеидам заболони ствола в крону дерева осуществляется путем смены горизонтов почвы с доступной влагой. Поэтому даже в засушливые 1-2-недельные периоды деревья хвойных пород не увядают и хвою не сбрасывают, но режим транспирации влаги заметно замедляется и тургор в клетках хвоинок снижается. Начало функционирования клеток ксилемы и ход формирования паренхимы, смоляных ходов, волокон либриформа и проводящих элементов трахеид в годичном кольце очередного года по всей высоте ствола дерева происходит последовательно с внутренней стороны камбия, сначала в слое ранней древесины, а в августе-сентябре и поздней древесины. Ход роста дерева в высоту опережает его утолщение по диаметру и происходит весной-начале лета в ходе фотосинтеза охвоенных побегов в кроне дерева, интенсивность которого зависит состояния и структуры его ассимиляционного аппарата. Ежегодно с наступлением теплой погоды на побегах сначала раскрываются ростовые почки, затем из них растут новые пучки из двух хвоинок, а из апикальных почек – новые побеги текущего года (рисунки 2-5).



Рисунок 2 – Рост новых побегов у деревьев сосны

Figure 2 – Growth of new shoots in pine trees

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition



Рисунок 3 – Цветение у деревьев сосны

Figure 3 – Flowering in pine trees

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



Рисунок 4 – Развитие на побегах деревьев сосны генеративных органов текущего (1) и прошлого года (2)

Figure 4 – Development of generative organs on pine tree shoots of the current (1) and last year (2)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition



Рисунок 5 – Рост и развитие на побегах деревьев сосны генеративных органов текущего (1), прошлого (2) и позапрошлого (3) года

Figure 5 – Growth and development on the shoots of pine trees of the generative organs of the current (1), last (2) and the year before (3) last

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

При этом с началом активного роста новых побегов интенсивно расходуются запасы питательных веществ, накопленные в тканях прошлого года, а новые их запасы только начинают формироваться и откладываться в очередном годичном кольце.

Материалы и методы

Объект исследований – 59-61-летние деревья и древостои, являющиеся семенным потомством разных географических лесостепных и степных экотипов сосны обыкновенной на полигоне «Ступинское поле» в Рамонском участковом лесничестве Воронежского лесничества.

Полигон географических культур был заложен на землях из-под сельскохозяйственного пользования путем посадки под меч Колосова в 1959 г. 2-летних сеянцев сосны, выращенных на местном питомнике из семян урожая 1956 г., заготовленных в разных лесничествах бывшего СССР. Всего на полигоне площадью 24,5 га представлено 245 экотипов

сосны, размешенных рядами в равновеликих по размеру блоках (0,05 га). Размещение сеянцев в рядах через 0,5 м, а рядов – через 1,5 м. Начальная густота посадки сеянцев всех экотипов одинаковая $\approx 13,0$ тыс. шт. на 1 га.

В течение 2018-2020 гг. в географических лесных культурах были заложены 32 пробные площади, в том числе 18 шт. – в лесостепных экотипах и 14 шт. – степных экотипах [17]. На каждой пробной площади (ПП) осуществляли сплошной переучет деревьев с измерением диаметра их стволов на высоте 1,3 м мерной вилкой с точностью 0,1 см и с одновременной оценкой санитарного состояния по соответствующим диагностическим признакам шкалы действующих «Правил санитарной безопасности в лесах»¹. Текущую сохранность деревьев на ПП определяли в процентах путем деления числа растущих деревьев на начальную густоту посадки сеянцев (13,0 тыс. шт./га). Другие лесоводственно-таксационные показатели деревьев и древостоев (средний диаметр и высота, полнота, запас) определяли по общепринятым в лесной таксации методикам. Название географическим экотипам дано по наименованию лесничеств, в которых были заготовлены семена в 1956 г.

Весной 2021 г. на каждой ПП у трех средних по диаметру и высоте модельных деревьев с западной стороны были взяты радиальные керны древесины при помощи возрастного бурава марки «Haglof-60» на высоте 1,3 м, относящихся к категории «без признаков ослабления» (рисунок 6).



Рисунок 6 – Керны древесины, извлеченные на высоте 1,3 м у средних по диаметру и высоте 62-летних модельных деревьев лесостепных (вверху) и степных (внизу) экотипов

Figure 6 – Wood cores extracted at a height of 1.3 m from 62-year-old medium-diameter and height model forest-steppe (above) and steppe (below) trees ecotypes

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Извлеченные у 96 модельных деревьев керны древесины датировали от периферии к сердцевине ствола дерева, начиная с последнего полного кольца 2020 г. На комплексе «Линтаб-6» и с помощью программы TsapWin² измеряли ширину каждого годичного кольца, а также ширину слоев ранней и поздней древесины. Всего измерено более 5,0 тыс. годичных колец с разделением их на раннюю и позднюю древесину. Полученные данные обрабатывали с помощью известных программ Statistica-8, Excel-10 и Excel-16.

Ниже приводятся полученные результаты, относящиеся к оценке влияния изменений климата на ширину и структуру годичных колец в 62-летних семенных потомствах лесостепных и степных географических экотипов сосны обыкновенной, перемещенных на полигон «Ступинское поле» на разное расстояние из разных регионов СССР.

Результаты

Установлено, что в теплые и влажные годы ширина слоев ранней и поздней древесины заметно больше, чем в засушливые или сухие годы. Кроме того, на изменение ширины и структуры (доли слоев ранней и поздней древесины в %) годичных колец, на тренды их динамики по календарным годам и конкретным этапам роста (молодняки, средневозрастные, припевающие, спелые и перестойные) и большое влияние оказывают меняющиеся во времени условия климата региона (температура, осадки, влажность, ГТК) предыдущего года [1, 3, 4].

Одним из объективных критериев выявления наличия и оценки степени влияния изменения климата на рост семенных потомств разных географических экотипов и является сравнительная оценка текущей сохранности деревьев в них на дату закладки ПП. По мере увеличения возраста деревьев

¹ Правила санитарной безопасности в лесах. /Утверждены Постановлением Правительства РФ от 20 мая 2017 г. № 607. URL: <http://rosleshoz.gov.ru> (дата обращения 10.09.2022)

² Rinn, F. TSAPWin Time series analysis and presentation: dendrochronology and related applications. Version 4.64 – Heidelberg, Germany. – 2011 – 92 p.

конкуренция между высаженными в 1959 г. растениями обострялась как внутри рядов, так и между смежными рядами. При этом в ходе естественного отбора, внутривидовой и индивидуальной изменчивости роста и развития деревьев, а также их реакции на изменения климата по вегетационным периодам и календарным годам происходила их дифференциация на лидирующие, средние и отстающие, обуславливающая внутреннюю структуру микропопуляций того или иного экотипа сосны и их текущую сохранность, а также соответствующее текущее санитарное состояние в том или ином возрасте, обусловленное наличием либо отсутствием вредных организмов, и величину естественного отпада в разные возрастные периоды.

Сведения о текущей сохранности деревьев на ПП в лесостепных и степных экотипах сосны приведены работах [4, 12, 13, 17, 19, 20, 21].

Текущая (на даты закладки ПП) сохранность 59-61-летних деревьев варьирует в достаточно широких пределах. Так, максимальная сохранность для лесостепных экотипов характерна для ПП 9-18 (Б. Сталинский экотип Курской области – 10,15 %), а минимальная – для ПП 1-18 (Хреновской экотип Воронежской области – 3,54 %). Максимальная сохранность деревьев в древостоях степных экотипов характерна для ПП 26-20 – 7,54% (Б. Михайловский экотип Днепропетровский области), а минимальная (2,46%) – для ПП 21-20 (Рахинский экотип Волгоградской области). Какой-либо закономерности в размещении и чередовании мест отпада деревьев на ПП в рядах культур лесостепных и степных экотипов сосны нами не было установлено. Различия текущей сохранности деревьев между двумя группами экотипов показаны на Boxplot-диаграмме (рисунок 7).

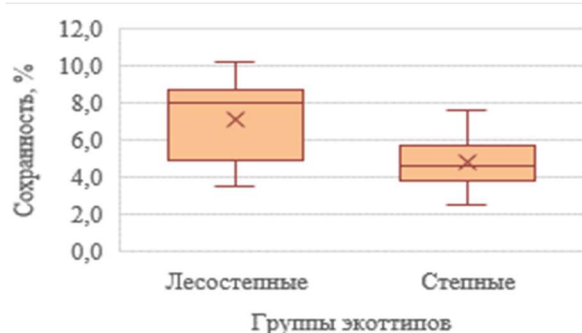


Рисунок 7 – Boxplot-диаграмма различий текущей сохранности деревьев на ПП в древостоях лесостепных и степных экотипов

Figure 7 – Boxplot-diagram of differences in the current preservation of trees on the SP in forest-steppe and steppe ecotype forest stands

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: own calculations

Установлено, что текущая сохранность деревьев в степных экотипах сосны отличается от лесостепных и варьирует от 2,5 до 7,5%. Средняя её величина в потомствах лесостепных экотипов равна 7,1 %, а у степных она меньше – 4,8 %. Полученные результаты статистически достоверны и подтверждают различия адаптационного потенциала степных экотипов в лесостепных условиях, а также их разную реакцию на изменение климата ($t_{0,95}=3,69 > 1,98$).

Подробная таксационная характеристика модельных деревьев, у которых были взяты радиальные керны древесины на высоте 1,3 м, на ПП в древостоях лесостепных и степных экотипов, приведена в монографии авторов [20].

Текущее распределение деревьев в древостоях лесостепных и степных экотипов сосны по категориям санитарного состояния показано на рисунке 8.

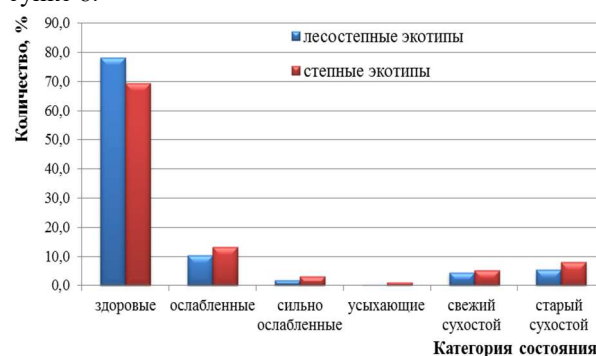


Рисунок 8 – Распределение числа деревьев по категориям санитарного состояния в древостоях лесостепных и степных экотипов

Figure 8 – Distribution of the number of trees by categories of sanitary condition in the stands of forest-steppe and steppe ecotypes

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: own calculations

В ходе анализа величин средних диаметров на высоте 1,3 м ($D_{1,3}$) и у поверхности почвы ($D_{0,0}$) у модельных деревьев с извлеченными кернами древесины установлено, что их различия у двух исследуемых групп экотипов статистически не достоверны.

Коэффициент достоверности различий $t_{0,95} = 0,78 < 1,98$.

Результаты анализа не существенности выявленных различий наглядно отражает статистическая Boxplot-диаграмма (рисунок 9).

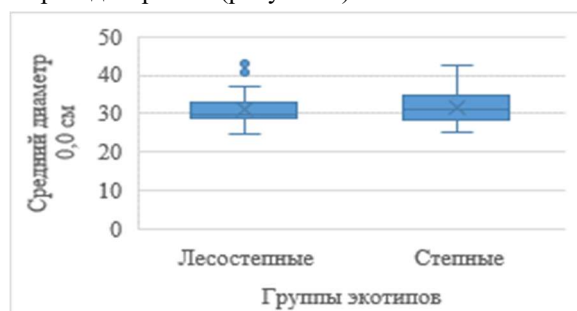


Рисунок 9 – Boxplot-диаграмма, отражающая несущественность различий величин средних диаметров на высоте 0,0 м у модельных деревьев на ПП в группах лесостепных и степных экотипов

Figure 9 is a Boxplot diagram reflecting the insignificance of differences in the values of average diameters at a height of 0.0 m in model trees on PP in groups of forest-steppe and steppe ecotypes

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: own calculations

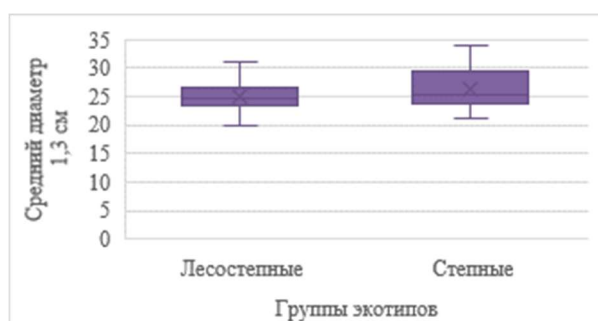


Рисунок 10 – Boxplot-диаграмма, отражающая несущественность различий величин средних диаметров на высоте 1,3 м у модельных деревьев на ПП в группах лесостепных и степных экотипов

Figure 10 is a Boxplot diagram reflecting the insignificance of differences in the values of average diameters at a height of 1.3 m in model trees on PP in groups of forest-steppe and steppe ecotypes

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: own calculations

Примеры изменения трендов радиального прироста средних модельных деревьев по календарным годам на ПП лесостепных и степных экотипов

для наглядности и сравнимости представлены соответственно на рисунках 11 и 12.

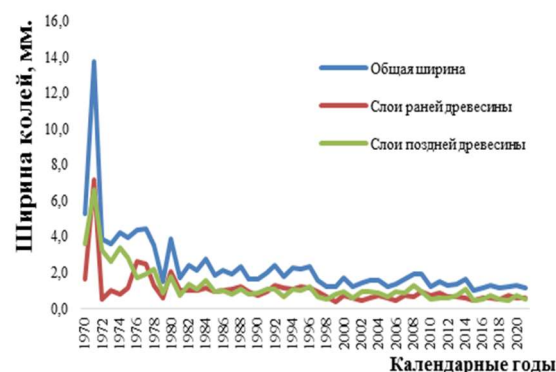


Рисунок 11 – Тренды изменения общей ширины годичных колец, слоев ранней и поздней древесины по календарным годам у средних модельных деревьев на ПП-22-20 (Арчединский экотип Волгоградской области)

Figure 11 – Trends of changes in the total width of annual rings, layers of early and late trees by calendar years in average model trees on PP-22-20 (Archedinsky ecotype of the Volgogradsky region)

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: own calculations

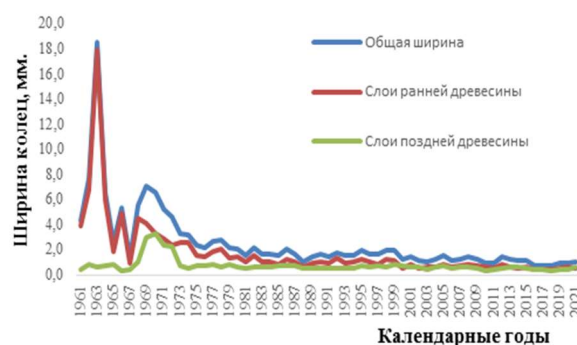


Рисунок 12 – Тренды изменения общей ширины годичных колец, слоев ранней и поздней древесины по календарным годам у средних модельных деревьев на ПП-16-20 (Совиевский экотип Черкасской области)

Figure 12 – Trends of changes in the total width of annual rings, layers of early and late wood by calendar years in medium-sized model trees on PP-16-20 (Sovievsky ecotype of Cherkassy region)

Источник: собственные вычисления авторов.
Source: own calculations

По характеру выявленных направлений трендов радиального прироста нами выделено три возрастных этапа их изменения:

- этап увеличения ширины годовичных колец после начала активного роста сеянцев в высоту и по диаметру и до полного смыкания молодняков, наступающего в 10 летнем возрасте;

- этап снижения ширины годовичных колец с 10 лет до 18 лет (для лесостепных экотипов) и до 20 лет (у степных экотипов);

- этап стабилизации радиального прироста с 18-20 летнего возраста и до настоящего времени

В связи с тем, что керны древесины у модельных деревьев извлекались в конце апреля 2021 г., то годовичное кольцо за этот календарный год еще не сформировалось. Поэтому датировка годовичных колец на кернах велась с 2020 календарного года. Ложные и выпавшие кольца не выявлены. У всех моделей отсутствует начальный период депрессии радиального прироста. При анализе данных о ширине и структуре годовичных колец по календарным годам на 32 ПП установлено, что увеличение общей ширины колец у лесостепных и степных экотипов наблюдалось синхронно в одни и те же календарные годы: 1967, 1978, 1990 и 2004 гг., характеризующиеся температурой ниже её среднесуточных величин и влажностью, превышающей среднесуточные их параметры [19].

В первой половине сезона (май-июль) колебания влажности и температуры отражаются в текущем годовичном кольце, а во второй (август-сентябрь) – в кольце следующего года. Причем увеличение прироста наблюдалось преимущественно за счет слоев ранней древесины, формирование которой по времени происходит в основном в первой половине вегетационного периода. Уменьшение общей ширины годовичных колец и соответственно слоев ранней и поздней древесины у всех экотипов наблюдалось в следующие годы - 1972, 1975, 1992, 2003 и 2010 гг. Однако ответная реакция на потепление или похолодание климата в отдельные календарные годы у лесостепных и степных экотипов различается как по абсолютной величине годовичного прироста, так и по относительной (%). Так, динамика ширины слоев поздней древесины, из-за более короткого периода их формирования (более теплая и засушливая

половина вегетационного периода по сравнению с весенним) по календарным годам более стабильная и мало изменчивая по сравнению со слоями ранней древесины. Установлено, что семенные потомства лесостепных и степных экотипов по-разному откликаются на изменения (потепление) климата.

Обсуждение

На основании анализа всей совокупности данных, полученных на 32 ПП в древостоях двух групп семенных потомств экотипов сосны, можно сделать общее заключение о том, что лучшее жизненное состояние имеют её лесостепные экотипы: 1,2 балла Колодезский из Липецкой, 1,3 балла Уразовский из Белгородской и 1,3 балла Б. Сталинский из Орловской областей, у которых признаки пластичности к изменяющимся климатическим условиям закреплены генетически. Худшим санитарным состоянием характеризуются степные экотипы сосны из Саратовской области (2,6 балла).

Оценка жизненного состояния древостоев 59-61-летних географических культур сосны обыкновенной в новых условиях произрастания показывает, что более высокий (лучший) средний балл имеют экотипы, семена которых были завезены из прилегающих к Воронежу районов с аналогичными или близкими природно-климатическими условиями. В целом для всей совокупности древостоев на ПП в лесостепных экотипах средневзвешенный балл состояния равен $1,6 \pm 0,06$ балла, а на ПП в степных экотипах он чуть меньше – $1,8 \pm 0,13$ балла.

Среди группы лесостепных экотипов лучшую текущую сохранность показал Б. Сталинский экотип из Курской области (10,5 %), а худшую – Хреновской (3,54 %) из Воронежской области и Платоновский (3,65 %) из Тамбовской области.

Среднестатистические величины общей ширины годовичных колец у модельных деревьев степных экотипов достоверно выше, чем у лесостепных ($2,346 \pm 0,210$ и $2,065 \pm 0,197$ мм). Аналогичная ситуация выявлена у этих двух групп экотипов по ширине слоев ранней ($1,360 \pm 0,148$ и $1,182 \pm 0,130$ мм) и поздней древесины ($0,986 \pm 0,072$ и $0,882 \pm 0,071$ мм соответственно).

Исследования по направленности трендов роста (увеличение ширины, уменьшение ширины и её

стабилизация), показали, что множественные параметры ширины годичных колец лесостепных и степных экотипов сосны в географических лесных культурах и её изменчивость обеспечивают четкое понимание реакции роста растений на изменение климата и могут рассматриваться как их положительные или отрицательные отклики для изучения климатических изменений в прошлые исторические периоды, в том числе и сезонных. При этом колебания зимних температур на прирост не влияют. Реакция деревьев на осадки в сравнении с температурой выражена более четко с мая по июнь. Дальнейшие более глубокие генетические исследования анатомической структуры годичных колец необходимо провести с использованием микрофотографий окрашенных тонких срезов древесины и ДНК-маркеров.

Выводы

Из всего изложенного выше можно сделать вывод о том, что семенные потомства степных эко-

типов более адаптивны и активно реагируют на изменившиеся климатические и лесорастительные условия, выражающиеся в увеличенных величинах радиального прироста по сравнению с лесостепными экотипами по календарным годам и этапам роста (до 10 лет, 11-20 лет и 41-60 лет), предопределяющих меньшую хозяйственно-техническую ценность и качество их стволовой древесины на протяжении всех этапов роста. Следовательно, с целью повышения хозяйственно-технической ценности стволовой древесины более целесообразно создавать новые сосновые леса в лесостепной лесорастительной зоне европейской части РФ из перспективных по комплексу признаков местных лесостепных экотипов.

Таким образом, при воспроизводстве сосновых лесов будущего в том или ином регионе необходимо использовать семена и посадочный материал только от местных и устойчивых к изменению климата популяций.

Список литературы

1. Тараканов, В. В. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) / В. В. Тараканов, М. М. Паленова, О. В. Паркина, Р. В. Роговцев, Р. А. Третьякова // Лесохозяйственная информация. — 2021. — № 1. — С. 100–143. — DOI: 10.24419/LHI2304-3083.2021.1.19.
2. Мерзленко, М. Д. Лесоводственные особенности деревьев лиственницы европейской разных классов Крафта в лесных культурах / М. Д. Мерзленко, В. А. Брынцев, П. Г. Мельник, А. А. Коженкова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2025. — № 4. — С. 9–19. — DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-9-19.
3. Мельник, П. Г. Рост, продуктивность и сохранность климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Мещёрской низменности / П. Г. Мельник // Лесной вестник / Forestry Bulletin. — 2024. — Т. 28, № 5. — С. 68–82. — DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-68-82.
4. Михайлова, М. И. Текущая сохранность, напряженность роста и санитарное состояние деревьев сосны обыкновенной в приспевающих географических лесных культурах Воронежской области / М. И. Михайлова, М. П. Чернышов // Лесотехнический журнал. — 2022. — Т. 12, № 1 (45). — С. 56–67. — DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/5.
5. Мерзленко, М. Д. Интродукция климатипов лиственницы европейской в зоне смешанных лесов / М. Д. Мерзленко, П. Г. Мельник, А. А. Коженкова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2022. — № 5. — С. 37–46. — DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-37-46.
6. Rabko, S., Kozel, A., Kimeichuk, I., & Yukhnovsky, V. (2021). Comparative assessment of some physical and mechanical properties of wood of different Scots pine climatypes. *Scientific Horizons*, 24(2), 27–36. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.27-36](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.27-36).
7. Галдина, Т. Е. Внутривидовое разнообразие *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи / Т. Е. Галдина, А. И. Чернодубов, М. И. Михайлова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2023. — № 3. — С. 84–98. — DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-84-98.
8. Stavrova, N., Gorshkov V., Katjutin P., Bakkal I. The structure of northern siberian spruce–scots pine forests at different stages of post-fire succession. *Forests*. 2020; 1(5): 558. DOI:org/10.3390/fl1050558

9. Yurttimaa, T., Saarinen N, Kankare V., et. all. Performing ground-based laser scanning to characterize stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown under growing conditions depends on structural changes. *Forest Journal of Photogrammetry Isprs and Remote. 2020; Sensing* 168. p. 277-287.
10. Parfenova E.I., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Tchebakova N.M. Climate Warming Impacts on Distributions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Zones and Seed Mass across Russia in the 21st Century. *Forests*, 2021; v. 12, p. 1097. DOI.org/ 10.3390/f12081097
11. Matisons, R., Jansone, D., Bāders, E., Dubra, S., Zeltiņš, P., Schneck, V., & Jansons, Ā. Weather–growth responses show differing adaptability of scots pine provenances in the south-eastern parts of baltic sea region. *Forests*.2021; 12(12). DOI:10.3390/f12121641
12. Chernyshov, M. P. The structure in diameter and sanitary condition of geographical cultures of Scots pine / M. P. Chernyshov, M. I. Mikhailova // International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions» (FORESTRY-2021), 9-10 September, 2021, Voronezh. –VOLUME 875. 875 p. 1-11 012054. DOI:10.1088/1755-1315/875/1/012054.
13. Михайлова, М. И. О лучших геоэкотипах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для искусственного лесовосстановления / М. И. Михайлова, М. П. Чернышов, С. В. Ребко // Лесотехнический журнал. — 2023. — Т. 13, № 4 (52), ч. 1. — С. 58–71. — DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/4.
14. Prietzel, J., Falk W., Pretzsch G., et. all. Half a century of monitoring the ecosystem of the common pine forest reveals the long-term consequences of atmospheric deposition and climate chang. *Glob. Chan. Biol.* 2020; 26 (10): 5796. DOI:10.1111/gcb.15265
15. Wen, T., Qu, Y., Lu, K., Guan, C., & Zhao, C. Combining tree-ring width and carbon isotope data to investigate stem carbon allocation in an evergreen coniferous species. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2022; 316. DOI:10.1016/j.agrformet.2022.108845
16. Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain // *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. 2021; v. 63 (2). pp. 138-149. DOI.org/ 10.2478/ffp-2021-0015
17. Михайлова, М. И. Особенности строения географических лесных культур сосны обыкновенной по диаметру / М. И. Михайлова, М. П. Чернышов // Лесотехнический журнал. — 2021. — Т. 11, № 1 (41). — С. 46–55. — DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/4.
18. Esper J., Riechelmann D.F.C., Holzkämper S. Circumferential and Longitudinal $\delta^{13}\text{C}$ Variability in a *Larix laricina* Trunk from the Swiss Alps. *Forests*. 2020; vol. 11, no. 1, art. no. 117. DOI.org/10.3390/f11010117
19. Чернышов, М. П. Географические лесные культуры сосны обыкновенной в Центральном Черноземье: монография / М. П. Чернышов, М. И. Михайлова ; ФГБОУ ВО «ВГЛУ». — Воронеж, 2024. — 196 с.
20. Yrttimaa T., Multisensorial close-range sensing generates benefits for characterization of managed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *ISPRS Int. J. Geo-Information*. 2020; 9. pp. 1-14. DOI:10.3390/ijgi9050309.

References

1. Tarakanov, V. V., Palenova, M. M., Parkina, O. V., Rogovtsev, R. V., & Tretyakova, R. A. (2021). Forest selection in Russia: achievements, problems, priorities [Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор)]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], (1), 100–143. <https://doi.org/10.24419/LHI2304-3083.2021.1.19> (in Russ.)
2. Merzlenko, M. D., Bryntsev, V. A., Melnik, P. G., & Kozhenkova, A. A. (2025). Silvicultural features of European larch trees of different Kraft classes in forest plantations [Лесоводственные особенности деревьев лиственницы европейской разных классов Крафта в лесных культурах]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal], (4), 9–19. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-9-19> (in Russ.)
3. Melnik, P. G. (2024). Growth, productivity and survival of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) climatypes in the conditions of the Meshchera Lowland [Рост, продуктивность и сохранность климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Мещёрской низменности]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 28(5), 68–82. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-5-68-82> (in Russ.)

4. Mikhailova, M. I., & Chernyshov, M. P. (2022). Current preservation, growth intensity and sanitary condition of Scots pine trees in maturing geographical forest cultures of the Voronezh region [Текущая сохранность, напряженность роста и санитарное состояние деревьев сосны обыкновенной в приспевающих географических лесных культурах Воронежской области]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 12(1(45)), 56–67. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/5> (in Russ.)
5. Merzlenko, M. D., Melnik, P. G., & Kozhenkova, A. A. (2022). Introduction of European larch climatotypes in the mixed forests zone [Интродукция климатипов лиственницы европейской в зоне смешанных лесов]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal], (5), 37–46. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-37-46> (in Russ.)
6. Rabko, S., Kozel, A., Kimeichuk, I., & Yukhnovsky, V. (2021). Comparative assessment of some physical and mechanical properties of wood of different Scots pine climatotypes. *Scientific Horizons*, 24(2), 27–36. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.27-36](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.27-36)
7. Galdina, T. E., Chernodubov, A. I., & Mikhailova, M. I. (2023). Intraspecific diversity of *Pinus sylvestris* L. in geographical cultures of the Central forest-steppe [Внутривидовое разнообразие *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal], (3), 84–98. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-84-98> (in Russ.)
8. Stavrova, N., Gorshkov V., Katjutin P., & Bakal, I. (2020). The structure of northern siberian spruce–scots pine forests at different stages of post-fire succession. *Forests*, 11(5), 558. <https://doi.org/10.3390/f11050558>
9. Yurtimaa, T., Saarinen, N., Kankare, V., et al. (2020). Performing ground-based laser scanning to characterize stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown under growing conditions depends on structural changes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.015>
10. Parfenova, E. I., Kuzmina, N. A., Kuzmin, S. R., & Tchebakova, N. M. (2021). Climate Warming Impacts on Distributions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Zones and Seed Mass across Russia in the 21st Century. *Forests*, 12(8), 1097. <https://doi.org/10.3390/f12081097>
11. Matisons, R., Jansone, D., Bāders, E., Dubra, S., Zeltiņš, P., Schneck, V., & Jansons, Ā. (2021). Weather–growth responses show differing adaptability of scots pine provenances in the south-eastern parts of baltic sea region. *Forests*, 12(12), 1641. <https://doi.org/10.3390/f12121641>
12. Chernyshov, M. P., & Mikhailova, M. I. (2021). The structure in diameter and sanitary condition of geographical cultures of Scots pine. In *International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions» (FORESTRY-2021)* (Vol. 875, p. 012054). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012054>
13. Mikhailova, M. I., Chernyshov, M. P., & Rabko, S. V. (2023). On the best geocotypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for artificial reforestation [О лучших геоэкотипах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для искусственного лесовосстановления]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 13(4(52), part 1), 58–71. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/4> (in Russ.)
14. Prietzel, J., Falk, W., Pretzsch, G., et al. (2020). Half a century of monitoring the ecosystem of the common pine forest reveals the long-term consequences of atmospheric deposition and climate change. *Global Change Biology*, 26(10), 5796–5815. <https://doi.org/10.1111/gcb.15265>
15. Wen, T., Qu, Y., Lu, K., Guan, C., & Zhao, C. (2022). Combining tree-ring width and carbon isotope data to investigate stem carbon allocation in an evergreen coniferous species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316, 108845. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108845>
16. Nakvasina, E. N., & Prozherina, N. A. (2021). Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 63(2), 138–149. <https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0015>

17. Mikhailova, M. I., & Chernyshov, M. P. (2021). Features of the structure by diameter of geographical forest cultures of Scots pine [Особенности строения географических лесных культур сосны обыкновенной по диаметру]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 11(1(41)), 46–55. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.1/4> (in Russ.)
18. Esper, J., Riechelmann, D. F. C., & Holzkämper, S. (2020). Circumferential and Longitudinal $\delta^{13}\text{C}$ Variability in a *Larix-decidua* Trunk from the Swiss Alps. *Forests*, 11(1), 117. <https://doi.org/10.3390/f11010117>
19. Chernyshov, M. P., & Mikhailova, M. I. (2024). *Geographical forest cultures of Scots pine in the Central Chernozem Region* [Географические лесные культуры сосны обыкновенной в Центральном Черноземье: монография]. VGLTU. (in Russ.)
20. Yrttimaa, T. (2020). Multisensorial close-range sensing generates benefits for characterization of managed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(5), 309. <https://doi.org/10.3390/ijgi9050309>

Сведения об авторах

✉ Михайлова Мария Игоревна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры ботаники и физиологии растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0000-0003-4767-8233, e-mail: schaxina.mary@yandex.ru.

Чернышов Михаил Павлович – доктор с.-х. наук, профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0000-0001-6360-1135, e-mail: lestaks53@mail.ru.

Information about the authors



✉ Maria I. Mikhailova – Lecturer of the Department of Botany and Plant Physiology of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, RCID: 0000-0003-4767-8233, e-mail: schaxina.mary@yandex.ru.


Mikhail P. Chernyshov – Professor of the Department of forestry, forest taxation and forest management, Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: 0000-0001-6360-1135 e-mail: lestaks53@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Продолжительность периода вегетации яблони домашней (*Malus domestica* Borkh) в Ботаническом саду им. Вс. М. Крутовского

Наталья В. Моксина ¹, n.moksina2010@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1387-0529>

Наталья П. Братилова ¹, nbratilova@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2918-9690>

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация

Проанализирована продолжительность периода вегетации (от набухания почек до окончания листопада) у 39 сортов яблони домашней, выращиваемой в стланцевой форме на территории сада им. Вс. М. Крутовского. Ботанический сад – структурное подразделение СибГУ им. М.Ф. Решетнева г. Красноярск. В процессе исследований выявлено, что самое раннее начало вегетации за период с 2004 по 2020 гг. произошло в 2014 г. В другие годы фаза набухания почек зафиксирована в последней декаде апреля или первой декаде мая. Начало вегетации позднее 10 мая отмечено в 2006, 2010 и 2018 гг. В период с 2004 по 2020 гг. конец листопада в большинстве случаев завершался до 17 октября, в отдельные годы (2004, 2007 и 2017) – до 23-24 октября. В 2006 и 2016 годах осенние заморозки помешали завершению вегетации, при которых листья замерзли на деревьях, что было отмечено у большинства сортов. Коротким периодом вегетации в данных условиях отличается сорт Аврора (селекции Вс. М. Крутовского). Продолжительность вегетации более 160 дней отмечалась у девяти сортов.

Ключевые слова: яблоня, сорт, фенология, изменчивость, набухание почек, листопад, вегетация

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания №FEFE-2024-0013 по заказу Министерства науки и высшего образования РФ коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» по теме «Селекционно-генетические основы формирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)».


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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Моксина, Н. В. Продолжительность периода вегетации яблони домашней (*Malus domestica* Borkh) в Ботаническом саду им. Вс. М. Крутовского / Н. В. Моксина, Н. П. Братилова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 68–81. – Библиогр.: с. 78–81 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/5>

Поступила 08.04.2025. **Пересмотрена** 02.09.2025. **Принята** 15.09.2025. **Опубликована онлайн** 25.09.2025.

Duration of the growing period of domestic apple tree (*Malus domestica* Borkh) in the Krutovsky Botanical garden

Natalya V. Moksina ¹✉, n.moksina2010@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1387-0529>

Natalia P. Bratilova ¹, nbratilova@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2918-9690>

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy Av., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Abstract

The duration of the growing season (from bud swelling to the end of leaf fall) was analyzed in 39 varieties of *Malus domestica* trees grown in a creeping form on the territory of the V. M. Krutovsky orchard. The Botanical Garden is a structural subdivision of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology in Krasnoyarsk. The research revealed that the earliest start of vegetation for the period from 2004 to 2020 occurred in 2014. In other years, the swelling phase of the kidneys is recorded in the last decade of April or the first decade of May. The beginning of the growing season later than May 10 was noted in 2006, 2010 and 2018. The end of leaf falls in most cases ended before October 17 during the period from 2004 to 2020, in some years (2004, 2007 and 2017) - before October 23-24. Autumn frosts prevented the completion of the growing season in 2006 and 2016, during which the leaves froze on the trees, which was noted in most varieties. The Aurora variety (selection by Vs. M. Krutovsky) has a short growing season under these conditions; A growing season of more than 160 days was observed in nine varieties.

Keywords: *apple tree, variety, phenology, variability, bud swelling, leaf fall, vegetation*

Funding: Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment No. FEFE-2024-0013 commissioned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation by the staff of the scientific laboratory "Breeding of woody plants" on the topic "Breeding and genetic foundations of the formation of target plantations and the rational use of wood resources in the Krasnoyarsk Territory (Yenisei Siberia)".

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

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

For citation: Moksina N. V., Bratilova N. P. (2024). Duration of the growing period of domestic apple tree (*Malus domestica* Borkh) in the Krutovsky Botanical garden. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 68-81 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/5>

Received 08.04.2025. **Revised** 02.09.2025. **Accepted** 15.09.2025. **Published online** 25.09.2025.

Введение

Яблоня – одна из самых популярных плодовых культур, благодаря своей универсальности. В России яблоня занимает значительную долю садоводческих площадей, что связано с её высокой урожайностью и спросом на яблоки [1]. На современном этапе развития адаптивного садоводства отбор

устойчивых сортов становится ключевым фактором, особенно в условиях изменения климата [2-4].

Подверженность заморозкам и плохое опыление являются серьезными проблемами при выращивании многолетних фруктовых садов, таких как яблоневого [5]. Прогнозирование весенней фенологии плодовых деревьев в умеренном климате вызывает серьезную озабоченность у специалистов по планированию садов и производителей фруктов [3, 6].

При этом изучение сроков наступления фенофаз позволяет предварительно рассчитывать и планировать проведение агротехнических мероприятий.

Мониторинг за ритмами развития растений и длительностью различных фенологических фаз играет ключевую роль в селекции аккомодированных сортов [7].

В настоящее время смещение сроков прохождения фенологических фаз яблони, связанные с изменением климата, привлекают большое внимание для моделирования и создания сортов, устойчивых к неблагоприятным условиям среды [8]. Фенологические реакции разных сортов яблони на изменение климата изучаются по регионам мира [9-10].

Начало вегетации сортов яблони находится в зависимости от температуры воздуха и сортовой принадлежности [11]. Выявлено значительное варьирование сроков наступления фенофаз по годам наблюдений [12]. Находясь под постоянным воздействием сезонной периодичности среды, древесные растения выработали в себе способность расти и развиваться в соответствии с этой периодичностью. Многолетнее изучение сезонных ритмов развития растений позволяет уточнять сроки вегетационного периода отдельно по сортам [13, 14].

Целью наших исследований явилось изучение продолжительности периода вегетации разных сортов яблони домашней (*Malus domestica* Borkh), произрастающих как «арктический стланец» в Ботаническом саду им. Вс. М. Крутовского.

Материалы и методы

Фенологические наблюдения за плодовыми деревьями сада проводились с 1994 г. по настоящее время. В данной работе представлены результаты исследований продолжительности периода вегетации яблони, произрастающей в стелющейся форме, с 2004 по 2020 гг. На момент начала наблюдений максимальный возраст деревьев составлял 90 лет, в 2020 г. – 116 лет.

В процессе фенологических наблюдений отмечали фазы набухания и распускания почек; начало и окончание цветения; достижение съемной

зрелости плодов; начало и окончание листопада. Таким образом, продолжительность периода вегетации считается от набухания почек до конца листопада. Фаза набухания почек (рисунок 1) характеризуется увеличением их размеров, при котором почечные чешуйки расходятся, и между ними появляются светло-зеленые полоски тканей молодых листьев. Фаза окончания листопада наступает, когда с дерева опало 75 % листьев.

Многолетние наблюдения позволили выделить группы сортов рано-, средне- и поздно начинающие вегетацию.

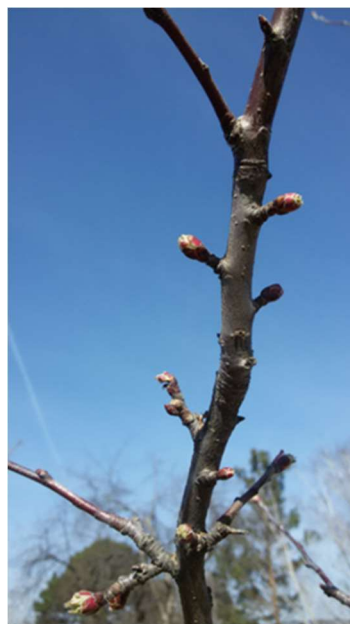


Рисунок 1. Набухание почек

Figure 1. Bud swelling

Источник: собственные фотографии авторов
Source: authors' own photographs

Результаты

Сад, который носит имя его создателя – Всеволода Михайловича Крутовского, - один из старейших участков Сибири, где выращиваются плодовые деревья [15-16]. Отделение сада, где яблоневые деревья произрастают в стланцевой форме, имеет площадь 2,8 га.

Средняя годовая температура воздуха приведена на рисунке 2, в период наблюдений она составляла от минус 0,6 в 2010 г. до 4,2 °C в 2020 г. [17].

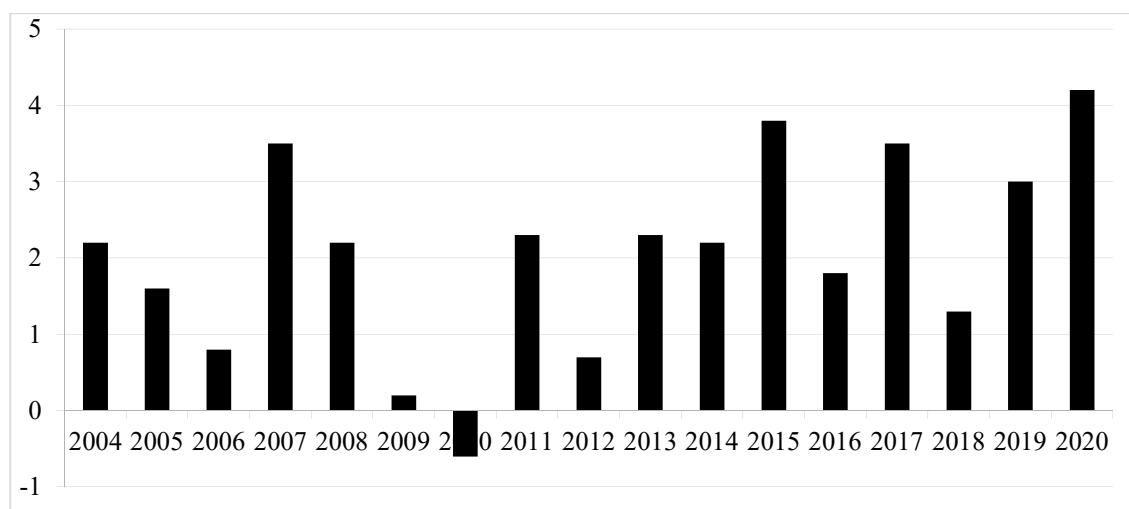


Рисунок 2. Средние годовые температуры воздуха в Красноярске, °C

Figure 2. Average annual air temperatures in Krasnoyarsk, °C

Источник: Архивы и статистика погоды по городам России. Красноярский край. Красноярск / Справочно-информационный портал. – URL: https://climate-energy.ru/weather/archive_weather_295740.php

Source: Arhivy i statistika pogody po gorodam Rossii. Krasnoyarskij kraj. Krasnoyarsk [Archives and weather statistics for Russian cities. Krasnoyarsk Region. Krasnoyarsk]. Spravochno-informacionnyj portal [Reference and information portal]. URL: https://climate-energy.ru/weather/archive_weather_295740.php. (In Russ.).

Начало вегетации у яблони в 2004 году отмечено 6-7 мая у восьми сортов (Аркад стаканчатый, Белый налив, Грушовка московская, Золотой шип, Медовка, Нобилис, Папировка, Петербургская летняя). У девяти сортов (Антоновка желтая, Антоновка обыкновенная, Аркад зимний, Коричное полосатое, Малиновка, Пепин-китайка, Тень, Терентьевка, № 22) на два дня позже - 8-9 мая.

У десяти сортов (Антипасхальное, Апорт среднерусский, Бабушкино, Бельфлер-китайка, Генерал Орлов, Зеленое Крутовского, Красноярский сибиряк, Кулон-китайка, Пепин шафранный, Ренет бергамотный, Славянка, Титовка, Шаропай) вегетация началась 10-11 мая.

Эта фенологическая фаза в 2005 г. была отмечена несколько раньше – с 2-4 мая у ранораспускающихся растений (Аркад стаканчатый, Белый налив, Грушовка московская, Золотой шип, Медовка, Нобилис и др.), разница между началом вегетации у остальных сортов была незначительной и составила 6 дней (6–7 мая вступили в эту фазу деревья сорта Генерал Орлов, Красноярский сибиряк, Пепин-китайка, Пепин шафранный, Славянка, Титовка, № 22, 8 мая – все остальные сорта).

В 2006 году все сорта характеризовались поздним выходом из состояния покоя, даже самые ранние из них. Так, большинство деревьев Аркада стаканчатого начали вегетацию 12 мая, а некоторые экземпляры - на 2-3 дня позже. Сорта Белый налив, Грушовка московская, Медовка, Нобилис, Папировка вступили в данную фазу 15-17 мая. Большая часть изученных деревьев начали вегетировать 17-22 мая. Отдельные экземпляры сортов Аркад зимний, Бельфлер-китайка, Пепин шафранный вступили в данную фазу 24-25 мая.

В 2007 году набухание почек наблюдалось с 24.04-25.04 у деревьев таких сортов, как Аврора, Аркад стаканчатый, Астраханское белое, Белый налив, Грушовка московская, Медовка, Малиновка, Нобилис, Петербургская летняя. Далее, 27-29 апреля - у сортов Анисик обыкновенный, Антипасхальное, Антоновка желтая, Аркад зимний, Бисмарк, Генерал Орлов, Золотой шип, Коричное полосатое, Папировка. Причем отдельные экземпляры Папировки начали вегетацию 28-30 апреля. С 30.04 по 01.05 начали вегетацию деревья сорта Бельфлер-китайка, позднее вступили в данную фазу (2-3 мая) растения сортов Антоновка обыкновенная, Апорт среднерусский, Пепин-китайка, Шаропай. Самое позднее

начало вегетации в этом году пришлось на деревья сорта Пеппин шафранный (05.05).

В 2008 году у сортов, характеризующихся ранней фенологической формой, набухание почек отмечалось 02-04.05. Несколько позже (5-6 мая) отмечено начало вегетации у среднераспускающихся сортов (Аркад зимний, Астраханское белое, Генерал Орлов, отдельные экземпляры сорта Бисмарк). Сорта Восковое, Ренет бергамотный, Титовка, Шаропай и большая часть экземпляров сорта Бисмарк начали вегетацию 7 - 8 мая.

В 2009 году разница в начале вегетации составила шесть дней, отмечена с 7 мая у сорта Аркад стаканчатый по 12 мая у отдельных экземпляров сортов Бисмарк, Пеппин-китайка.

Сорта, характеризующиеся ранним началом вегетации (Аркад стаканчатый, Белый налив, Грушовка московская, Петербургская летняя, Терентьевка) в 2010 году вступили в данную фазу 8-9 мая. У большинства сортов начало вегетации пришлось на 9-11 мая (Бельфлер-китайка, Бисмарк и др.). Позднее начало вегетации отмечено у сортов Кулон-китайка, Пеппин-китайка, Тень, Шаропай и отдельных экземпляров сорта Папировка (с 12 мая). 2011 год характеризовался ранним началом вегетации, с 22 по 29 апреля. Раньше всех данная фаза отмечалась у деревьев сорта Аркад стаканчатый. В 2012 году начало вегетации наблюдалось с 25.04 по 01.05. В 2013 году фаза набухания почек отмечалась в первой декаде мая. В 2014 году положительные среднесуточные температуры наступили в апреле, но затем длительное время держались на низком уровне. Так, среднесуточная температура апреля составила 7,0 °С, а в мае данный показатель составил 7,2 °С [16]. В связи с чем отмечено раннее набухание почек (08-10.04) у большого количества сортов. На несколько дней позже (11-15.04) вступили в данную фазу сорта Антоновка желтая, Аркад зимний, Астраханское белое, Бельфлер-китайка, Генерал Орлов. Самое позднее набухание почек отмечалось 19-24.04. Цветение

в этом году состоялось в последней декаде мая – первой декаде июня. В 2015 году почки деревьев начинали набухать с 24.04 по 29.04. В 2016 году начало вегетации отмечалось с 25.04 по 30.04. В 2017 году наблюдалось более позднее начало набухания почек, которое у большинства изученных сортов произошло 06-07.05. У восьми сортов (№ 22, Антоновка желтая, Анисик обыкновенный, Антоновка обыкновенная, Астраханское белое, Коричное полосатое, Пеппин-китайка, Тень) данная фаза наступила 08-09.05. У шести сортов (Аркад зимний, Бельфлер-китайка, Бисмарк, Красноярский сибиряк, Кулон-китайка, Пеппин шафранный) – 10.05. Позже всех (12 мая) начали вегетацию деревья сортов Генерал Орлов, Зеленое Крутовского, Ренет бергамотный, Шаропай. В 2018 году отмечено неравномерное наступление фазы набухания почек: у отдельных деревьев сортов Аркад стаканчатый, Грушовка московская, Золотой шип и Нобилис – 03.05. Большая часть экземпляров вступила в вегетацию 08-15.05, растения сорта № 22 – 18.05. В 2019 году наступление данной фазы было растянуто по времени с 05.05 по 14.05. В 2020 году вегетация началась раньше всего у сорта Аркад стаканчатый - с 24-25.04. Самое позднее наступление данной фазы отмечалось у деревьев сорта Шаропай (27-29.04).

По результатам 17-летних наблюдений можно сделать вывод, что наиболее раннее набухание почек у стелющихся деревьев яблони в мемориальной части сада им. Вс. М. Крутовского произошло в 2014 году. В другие годы раннее начало вегетации у большинства деревьев наблюдалось в 2007, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016 и 2020 гг., в начале мая - отмечено в 2004, 2005, 2008, 2009, 2017 и 2019 гг. Самое позднее наступление данной фазы (позднее 10.05) зафиксировано в 2006, 2010 и 2018 годах (рис. 3).

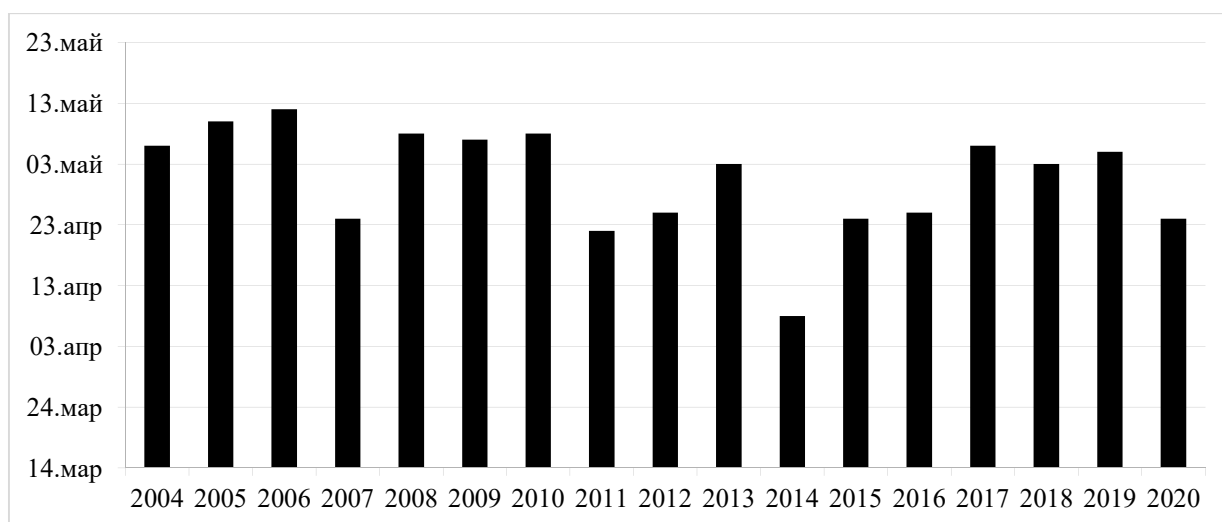


Рисунок 3. Дата начала вегетации яблони по годам наблюдений

Figure 3. Date of the beginning of the apple tree vegetation by years of observations

Источник: собственные наблюдения авторов

Source: authors' own observations

После выхода плодового дерева из состояния глубокого покоя, после оттепелей и при резких колебаниях температуры воздуха днем и ночью, генеративные почки могут повреждаться низкими температурами. Большой вред плодовым насаждениям причиняют весенние заморозки до и во время цветения, в отдельные годы полностью уничтожая урожай [18]. Наибольший интерес представляют сорта и отдельные экземпляры, отличающиеся поздним наступлением цветения, как менее подверженные действию поздних весенних заморозков [19]. По

мнению Н. Г. Красовой с соавторами, для успешного развития садоводства требуются конкурентоспособные сорта, не уступающие иностранным [20].

Самое раннее начало цветения за период с 2004 по 2020 гг. наблюдалось 5 мая (в 2020 г.). Самое позднее наступление данной фазы отмечалось 2 июня (в 2006 и 2018 гг.).

Продолжительность цветения (от начала зацветания самого раннего сорта до окончания цветения самого позднего) варьировала от 14 до 23 дней (таблица 1).

Таблица 1

Начало и средняя продолжительность цветения по годам, дни

Table 1

Beginning and average duration of flowering by year, days

Годы years	Дата начала цветения Date of beginning of flowering	Дата конца цветения Date of end of flowering	Максималь- ная продол- жительность цвете- ния Maxi- mum duration of flowering	Годы years	Дата начала цветения Date of beginning of flowering	Дата конца цветения Date of end of flowering	Максималь- ная продол- жительность цвете- ния Maxi- mum duration of flowering
2004	23.05	09.06	18	2013	21.05	03.06	14
2005	28.05	18.06	22	2014	20.05	09.06	21
2006	02.06	14.06	13	2015	23.05	14.06	23
2007	15.05	04.06	21	2016	24.05	12.06	20
2008	28.05	14.06	18	2017	22.05	9.06	19
2009	27.05	10.06	15	2018	02.06	16.06	15
2010	31.05	17.06	18	2019	29.05	17.06	20

2011	23.05	14.06	23	2020	05.05	27.05	23
2012	25.05	08.06	14	Среднее			18,6 ± 0,61

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Средняя продолжительность цветения за 17-летний период наблюдений составила $9,7 \pm 0,40$ дней. Уровень изменчивости высокий ($V = 33,4 \%$).

Отмечено достоверно более длительное превышение продолжительности данной фенологической фазы в 2004, 2005, 2007, 2008, 2014, 2017 и 2020 гг. (таблица 2).

Таблица 2

Статистические показатели продолжительности цветения яблони по годам

Table 2

Statistical indicators of the duration of apple tree flowering by year

Годы years	Статистические показатели Statistical indicators					
	$X_{cp.}$	$\pm \sigma$	$\pm m$	$V, \%$	$P, \%$	$t_{\phi} (t_{05} = 1,99; t_{10} = 1,78)$
2004	11,7	1,20	0,08	10,3	0,6	4,90
2005	13,0	1,32	0,08	10,1	0,6	8,09
2006	6,6	1,35	0,09	20,4	1,3	7,56
2007	11,0	1,55	0,11	14,1	1,0	3,13
2008	12,4	6,65	0,43	53,6	3,5	4,60
2009	10,3	1,09	0,07	10,6	0,7	1,48
2010	8,6	1,25	0,08	14,5	0,9	2,70
2011	6,2	1,08	0,07	17,4	1,1	8,62
2012	6,4	0,92	0,07	14,5	1,1	8,13
2013	9,1	1,67	0,31	18,4	3,4	1,19
2014	11,3	1,49	0,10	13,2	0,9	3,88
2015	7,8	1,60	0,10	20,5	1,3	4,61
2016	8,4	1,48	0,09	17,7	1,1	3,17
2017	11,7	1,20	0,08	10,3	0,6	4,90
2018	10,1	6,20	0,39	61,3	3,9	0,72
2019	8,6	1,06	0,07	12,4	0,8	2,71
2020	11,7	1,82	0,12	15,5	1,0	4,79
Среднее average	9,7	2,18	0,40	33,4	4,1	-

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Наибольшей продолжительностью цветения яблоня характеризовалась в 2005 г. ($13,0 \pm 0,08$ дней), самая короткая длительность данной фазы составила $6,2 \pm 0,07$ дней в 2011 г.

Низкий уровень изменчивости данного параметра отмечался в 2004, 2005, 2009 и 2017 гг. Очень высокий уровень изменчивости наблюдался в 2008 и 2018 гг.

Характеризуя продолжительность цветения по сортам за период с 2004 по 2020 гг. можно отметить, что у сорта Антоновка обыкновенная данный

показатель варьирует от $6,2 \pm 0,28$ дней в 2006 г. до $13,7 \pm 0,24$ дней в 2004 г. Максимальная продолжительность цветения у сорта Аркада зимний наблюдалась в 2005 г. ($13,8 \pm 0,12$ дней), у Бисмарка и Генерала Орлова – в 2020 ($12,5 \pm 0,26$ и $12,9 \pm 0,25$ дней соответственно). Самый продолжительный срок цветения среди сортов зимнего срока созревания было зафиксировано у сорта Пепин шафранный в 2020 г. - $13,6 \pm 0,37$ дней. Среди сортов летнего срока созревания максимальная продолжительность

цветения отмечена у сорта Белый налив в 2005 г. ($14,2 \pm 0,15$ дней).

Окончание вегетационного периода в 2004 г. позднее всех наступило у сорта Генерал Орлов – 24 октября. В 2005 г. окончание листопада наблюдалось с 30 сентября по 12 октября. Самое позднее наступление данной фенологической фазы отмечено у отдельных экземпляров сорта Папировка. В 2006 г. окончание периода вегетации отмечено 2 октября у всех яблонь в саду, так как листья были повреждены заморозками и почернели. В 2007 г. окончание листопада фиксировалось с 1 по 20 октября в зависимости от сортовой принадлежности деревьев. В 2008 году данная фаза отмечалась с 30 сентября по 12 октября. В 2009 г. позднее сбрасывание листьев также наблюдалось у сортов Папировка и Шаропай – 14 октября. Конец листопада в 2010 г. отмечался с 13 октября. Позже всех данная фаза наступила у деревьев сорта Антоновка обыкновенная. Окончание листопада в 2011 году отмечалось 12-14 октября, самое позднее – у сорта Пепин шафранный (17 октября). В 2012 году окончание листопада отмечалось с 29.09 по 15.10, в 2013 г. – в середине октября. В 2014 г. раньше всех листопад закончился у сорта Золотой шип в конце сентября. У сортов Аркад стаканчатый, Белый налив, Грушовка московская листья опали к 2 октября. Дольше всех держались на деревьях листья у сортов Антоновка обыкновенная и Папировка – до 13 октября. В 2015 г. самыми последними закончили листопад экземпляры сорта Пепин шафранный – 16 октября. Среднемесячная температура октября в 2016 г. составила минус

4 °С. Сорта, которые характеризуются ранним окончанием листопада, успели сбросить листву в самом начале октября. У деревьев других сортов листовые пластинки замерзли и почернели. В 2017 г. у некоторых сортов (Антоновка обыкновенная, Аркад зимний, Бисмарк, Папировка, Пепин-китайка, Пепин шафранный, Шаропай) конец листопада закончился в конце второй – начале третьей декады октября. Самое позднее окончание листопада в 2018 и 2019 гг. отмечено у сорта Шаропай (17 и 16 октября соответственно), а в 2020 г. – у сорта Пепин шафранный (16 октября).

За представленный период фаза конца листопада в большинстве наблюдаемых периодов завершилась до 17 октября. В 2004, 2007 и 2017 гг. листопад длился до третьей декады октября и закончился 24, 20 и 23 октября соответственно. В 2006 и 2016 гг. осенние заморозки помешали завершению вегетации, и у более 50 % сортов листья замерзли на деревьях.

Продолжительность периода вегетации в среднем за 17-летний срок наблюдений составляет $157,1 \pm 0,51$ дней. Данный показатель варьировал по годам от $140,9 \pm 1,12$ в 2006 г. до $175,5 \pm 1,19$ дней в 2014 г. Достоверно меньшая продолжительность периода вегетации отмечается в 2006, 2009, 2010, 2018 и 2019 гг. (таблица 3). Более длительными периодами вегетации характеризовались 2007, 2011, 2014, 2015 и 2020 гг.

Таблица 3

Средняя продолжительность периода вегетации по годам, дни

Table 3

Average length of the growing season by years, days

Годы years	Статистические показатели Statistical indicators					
	$X_{cp.}$	$\pm \sigma$	$\pm m$	P, %	V, %	$t_{\Phi} (t_{05}= 1,99; t_{10}= 1,78)$
2004	157,1	10,47	3,16	2,0	6,7	0,01
2005	156,0	6,61	1,99	1,3	4,2	0,53
2006	140,9	3,71	1,12	0,8	2,6	13,17
2007	166,0	5,11	1,54	0,9	3,1	6,00
2008	154,7	3,83	1,15	0,7	2,5	1,89
2009	147,7	5,90	1,78	1,2	4,0	5,08
2010	148,4	3,76	1,13	0,8	2,5	6,97
2011	161,8	6,09	1,83	1,1	3,8	2,47

2012	156,0	6,24	1,88	1,2	4,0	0,56
2013	159,3	5,84	1,76	1,1	3,7	1,22
2014	175,5	3,93	1,19	0,7	2,2	14,25
2015	162,5	5,98	1,80	1,1	3,7	2,85
2016	159,5	4,14	1,25	0,8	2,6	1,79
2017	156,1	10,44	3,15	2,0	6,7	0,33
2018	149,7	2,59	0,78	0,5	1,7	7,93
2019	150,0	2,01	0,61	0,4	1,3	8,94
2020	161,2	5,74	1,73	1,1	3,5	2,83
Среднее average	157,1	7,30	0,51	0,3	4,6	-

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Следует отметить очень низкий уровень изменчивости показателя продолжительность периода вегетации по годам.

Средняя продолжительность периода вегетации по сортам, показывает, что самым коротким показателем характеризуется сорт Аврора $149,4 \pm 3,43$ дня.

Продолжительностью периода от начала вегетации до его окончания менее 155 дней характеризуются 12 сортов (Аврора, Белый налив, Грушовка московская, Нобилис, Анисик обыкновенный, Астраханское белое, Бабушкино, Красноярская красавица, Медовка, Петербургская летняя, Тень, Терентьевка), что составляет 29 % от общего количества. Большинство сортов (45 %), характеризуются продолжительностью периода вегетации от 155 до 160 дней. К ним относятся Аркад стаканчатый, Аркад зимний, Генерал Орлов, Золотой шип, Антипасхальное, Антоновка желтая, Антоновка шафранная,

Апорт среднерусский, Бельфлер-китайка, Восковое, Красноярский сибиряк, Кулон-китайка, Ренет бергамотный, Славянка, Титовка, № 22. У девяти сортов (Антоновка обыкновенная, Бисмарк, Папировка, Пепин шафранный, Воронежский воргуль, Коричное полосатое, Красноярское, Пепин-китайка, и Шаропай) данный период более 160 дней.

Следует отметить, что достоверно меньшей средней протяженностью периода вегетации за 17 лет при 90 %-ном уровне вероятности характеризовались сорта Аврора, Нобилис, Белый налив, Анисик обыкновенный и Тень. Некоторые сорта имеют достоверно более продолжительный период вегетации: Антоновка обыкновенная, Папировка, Пепин шафранный, Воронежский воргуль и Шаропай (таблица 4).

Средняя продолжительность вегетации по сортам, дни

Таблица 4

Table 4

Average duration of vegetation by variety, days

Сорт variety	Статистические показатели Statistical indicators					
	$X_{cp.}$	$\pm \sigma$	$\pm m$	P, %	V, %	$t_{\Phi} (t_{05}= 1,99; t_{10}= 1,78) $
Антоновка обыкновенная Antonovka obiknovennaya	162,1	9,27	2,32	1,4	5,7	2,10
Аркад зимний Arkad zimniy	155,7	9,12	2,28	1,5	5,9	0,60
Аркад стаканчатый Arkad stakanchaty	155,0	7,78	1,94	1,3	5,0	1,04
Белый налив Bely naliv	152,9	8,62	2,16	1,4	5,6	1,88
Бисмарк Bismark	160,5	10,14	2,53	1,6	6,3	1,32
Генерал Орлов General Orlov	158,8	10,01	2,50	1,6	6,3	0,68

Естественные науки и лес

Грушовка московская Grushovka moskovskaya	154,3	8,61	2,15	1,4	5,6	1,28
Золотой шип Zolotoy ship	155,5	9,12	2,28	1,5	5,9	0,67
Нобилис Nobilis	151,2	11,56	2,89	1,9	7,6	2,03
Папировка Papirovka	162,0	9,53	2,38	1,5	5,9	2,02
Пепин шафранный Pepin shafranny	161,6	9,64	2,41	1,5	6,0	1,83
Аврора Aurora	149,4	13,74	3,43	2,3	9,2	2,22
Анисик обыкновенный Anisik obiknovenny	150,0	10,76	2,69	1,8	7,2	2,59
Антипасхальное Antipashalnoe	156,0	10,05	2,51	1,6	6,4	0,43
Антоновка желтая Antonovka geltaya	158,1	8,36	2,09	1,3	5,3	0,46
Антоновка шафранная Antonovka shafrannaya	159,8	13,24	3,31	2,1	8,3	0,81
Апорт среднерусский Aport srednerusskiy	158,7	11,36	2,84	1,8	7,2	0,55
Астраханское белое Astrakhanskoe beloe	152,9	10,92	2,73	1,8	7,1	1,51
Бабушкино Babushkino	154,1	7,47	1,87	1,2	4,8	1,55
Бельфлер-китайка Befler-kitayka	156,2	9,36	2,34	1,5	6,0	0,38
Воронежский воргуль Voronezhsky vorgul	162,8	9,64	2,41	1,5	5,9	2,31
Восковое Voskovoe	156,9	8,19	2,05	1,3	5,2	0,09
Зеленое Крутовского Zelenoe Krutovskogo	155,4	6,27	1,57	1,0	4,0	1,03
Коричное полосатое Korichnoe polosatое	160,1	11,49	2,87	1,8	7,2	1,03
Красноярская красавица Krasnoyarskaya krasavitsa	153,9	9,40	2,35	1,5	6,1	1,33
Красноярское Krasnoyarskoye	160,8	10,56	2,64	1,6	6,6	1,38
Красноярский сибиряк Krasnoyarsky Sibiryak	156,5	7,39	1,85	1,2	4,7	0,31
Кулон-китайка Kulon-kitayka	156,1	8,31	2,08	1,3	5,3	0,47
Медовка Medovka	154,5	9,21	2,30	1,5	6,0	1,10
Пепин-китайка Pepin-kitayka	160,5	11,56	2,98	1,9	7,2	1,12
Петербургская летняя Peterburgskaya letnyaya	153,7	8,64	2,16	1,4	5,6	1,53
Ренет бергамотный Renet Bergamotny	155,8	9,48	2,37	1,5	6,1	0,54
Славянка Slavyanka	155,3	9,06	2,26	1,5	5,8	0,78
Титовка Titovka	156,9	11,36	2,93	1,9	7,2	0,07
Тень Ten'	153,4	7,06	1,77	1,2	4,6	2,01
Терентьевка Terent'evka	153,4	9,48	2,37	1,5	6,2	1,53
Шаропай Sharopay	163,3	8,47	2,12	1,3	5,2	2,84
№ 22 № 22	158,8	8,12	2,03	1,3	5,1	0,81

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Выявлен очень низкий уровень изменчивости показателя продолжительности вегетации у большинства сортов яблони, за исключением сортов Аврора и Антоновка шафранная, у которых коэффициент варьирования признака свидетельствует о низком уровне изменчивости ($V = 9,2$ и $8,3$ % соответственно).

Заключение

Проведенные исследования позволили выделить сорта, отличающиеся поздним началом вегетации (Антипасхальное, Аркад зимний, Бисмарк, Восковое, Генерал Орлов, Пепин шафранный, Ренет бергамотный, Титовка, Шаропай), что позволяет им избегать поздних весенних заморозков.

Отсортированы сорта по продолжительности периода вегетации. Длительным периодом (более 160 дней) характеризовались 9 сортов: Антоновка

обыкновенная, Бисмарк, Воронежский воргуль, Коричное полосатое, Красноярское, Папировка, Пепин-китайка, Пепин шафранный, Шаропай. Периодом вегетации от 156 до 160 дней характеризуется 14 сортов (Антипасхальное, Антоновка желтая, Антоновка шафранная, Апорт среднерусский, Аркад зимний, Бельфлер-китайка, Восковое, Генерал Орлов, Золотой шип, Красноярский сибиряк, Кулон-китайка, Ренет бергамотный, Титовка, № 22). Еще 14 сортов имеют период вегетации продолжительностью от 150 до 155 дней. Это такие сорта, как Анисик обыкновенный, Аркад стаканчатый, Астраханское белое, Бабушкино, Белый налив, Грушовка московская, Зеленое Крутовского, Красноярская красавица, Медовка, Нобилис, Петербургская летняя, Славянка, Тень, Терентьевка. Наиболее короткий вегетационный период отмечался у сорта Аврора - $149,4 \pm 3,43$ дней.

Список литературы

1. Шахмирзоев Р.А. Фенология сортов яблони в агроклиматических условиях Юга-Дагестана // Экология и природопользование: материалы Международной научно-практической конференции, Магас, 21–23 октября 2020 года. – Магас: ООО "КЕП". – 2020. – С. 463–469.
2. Ульяновская Е.В., Супрун И.И., Богданович Т.В., Чернуцкая Е.А., Токмаков С.В., Таловина Г.В. Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 2023. – Т. 184, No 4. – С. 174–189. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-4-174-189>
3. Chen R., Wang J., Li Y., Bai R., Huang M., Zhang Z., Zhao L., Qu Z., Liu L. Higher risk of spring frost under future climate change across China's apple planting regions. *European Journal of Agronomy*. 2024; Vol. 159: P. 127288. DOI:10.1016/j.eja.2024.127288.
4. Liu Lu, Guo Liang, Wang Jing-hong, Luan Qing, Fu Wei-dong, Li Man-hua Phenological responses of apple tree to climate warming in the main apple production areas in northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2020, 31(3): 845–852. DOI:10.13287/j.1001-9332.202003.026
5. Ru X., Zhou J., Gong K., He Z., Dai Z., Li M., Feng X., Yu Q., Feng H., He J. Climate warming may accelerate apple phenology but lead to divergent dynamics in late-spring frost and poor pollination risks in main apple production regions of China. *European Journal of Agronomy*. 2023; Vol. 150: 126945. DOI 10.1016/j.eja.2023.126945.
6. Luedeling E., Schiffrers K., Fohrmann T., Urbach C. PhenoFlex - an integrated model to predict spring phenology in temperate fruit trees. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2021; Vol. 307: P. 108491. DOI:10.1016/j.agrformet.2021.108491.
7. Казиев М.А., Шахмирзоев Р.А. Совершенствование сортимента интенсивного садоводства Дагестана // Аграрная наука. – 2021. – № 10. – С. 94–98. – DOI 10.32634/0869-8155-2021-353-10-94-98.
8. Darbyshire R., Farrera I., Martinez-Lüscher J., Berenhausser Leite G., Mathieu V., El Yaacoubi A., Legave J.-M. A global evaluation of apple flowering phenology models for climate adaptation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017; Vol. 240: 67–77. DOI:10.1016/j.agrformet.2017.03.021.

9. Delgado A., Egea J.A., Luedeling E., Dapena E. Agroclimatic requirements and phenological responses to climate change of local apple cultivars in northwestern Spain. *Scientia Horticulturae*. 2021; Vol. 283: 110093. DOI:10.1016/j.scienta.2021.110093.
10. Szalay L., Bakos J., Toth M. Frost hardiness of apple generative buds during dormancy. *Acta agriculturae Slovenica* .118(4):1. DOI:10.14720/aas.2022.118.4.2677
11. Чернуцкая Е.А. Комплексная оценка селекционного материала яблони разной плоидности для создания устойчивых к парше генотипов: диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. – Краснодар. – 2024. – 165 с.
12. Куликов М., Шибков Е., Исаев Э., Азаров А., Сайдл Р. Пространственно - временные закономерности реакции различных древесных видов на климатические факторы на юге Кыргызстана // Центральноазиатский журнал исследования климата и устойчивого развития. – 2023. – 2(2). – С. 98-128 <https://doi.org/10.29258/CAJSCR/2023-R1.v2-2/98-128.rus>
13. Репях М.В. Изменчивость наступления фенологических фаз у яблони в ботаническом саду им. Вс.М. Крутовского // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 3-2(117). – С. 46-50. – DOI 10.23670/IRJ.2022.117.3.046.
14. Седов, Е.Н., Корнеева С.А., Янчук Т.В. Яблочный календарь из сортов селекции ВНИИСПК // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1(68). – С. 8-13.
15. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Елисеев С.Г. Всеволод Михайлович Крутовский – создатель ботанического сада // Хвойные бореальной зоны. – 2024. – Т. XLII, № 6. С. 7–10.
16. Братилова Н.П. Герасимова О.А., Моксина Н.В. Биологическая продуктивность крупноплодных сортов яблони, выращиваемой в открытой и стелющейся форме в ботаническом саду им. ВС. М. Крутовского. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – 2024. – 148 с. – ISBN 978-5-86433-956-5
17. Архивы и статистика погоды по городам России. Красноярский край. Красноярск / Справочно-информационный портал. – URL: https://climate-energy.ru/weather/archive_weather_295740.php
18. Красова Н.Г. Биоресурсная коллекция яблони ВНИИСПК формирование, изучение, использование. – Орёл: Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур. – 2024. – 256 с. – ISBN 978-5-6049204-7-3.
19. Репях М.В., Усова Е.А. Сезонный ритм развития яблони на коллекционном участке и нижней террасе Ботанического сада им. Вс. М. Крутовского // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. – 2023. – Т. 26. – С. 140-143.
20. Красова Н.Г., Ожерельева З.Е., Галашева А.М., Макаркина М.А., Лупин М.В. Оценка адаптивности и качества плодов сортов яблони для интенсивных садов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 2022. Т. – 183, № 4. – С. 48-59. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-4-48-59>.

References

1. Shahmirzoev R.A. *Fenologiya sortov yabloni v agroklimalicheskikh usloviyakh Yuga-Dagestana* [Phenology of apple varieties in the agroclimatic conditions of South Dagestan] *Ekologiya i prirodopol'zovanie: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Ecology and environmental management: materials of the International Scientific and Practical Conference. Magas: ООО «КЕР». 2020: 463-469. (In Russ.).
2. Ulyanovskaya E.V., Suprun I.I., Bogdanovich T.V., Chernuckaya E.A., Tokmakov S.V., Talovina G.V. *Nomenklaturnye standarty i geneticheskie pasporta sortov yabloni selekcii Severo-Kavkazskogo federalnogo nauchnogo centra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya* [Nomenclature standards and genetic passports of apple varieties bred by the North Caucasus federal scientific center for horticulture, viticulture, and winemaking] *Trudy po prikladnoj botanike, genetike i selekcii* = Works on applied botany, genetics, and breeding. 2023. 184(4): 174-189. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-4-174-189>. (In Russ.).

3. Chen R., Wang J., Li Y., Bai R., Huang M., Zhang Z., Zhao L., Qu Z., Liu L. *Higher risk of spring frost under future climate change across China's apple planting regions*. European Journal of Agronomy. 2024; Vol. 159: P. 127288. DOI:10.1016/j.eja.2024.127288.
4. Liu Lu, Guo Liang, Wang Jing-hong, Luan Qing, Fu Wei-dong, Li Man-hua *Phenological responses of apple tree to climate warming in the main apple production areas in northern China*. Chinese Journal of Applied Ecology. 2020, 31(3): 845-852. DOI:10.13287/j.1001-9332.202003.026
5. Ru X., Zhou J., Gong K., He Z., Dai Z., Li M., Feng X., Yu Q., Feng H., He J. *Climate warming may accelerate apple phenology but lead to divergent dynamics in late-spring frost and poor pollination risks in main apple production regions of China*. European Journal of Agronomy. 2023; Vol. 150: 126945. DOI 10.1016/j.eja.2023.126945.
6. Luedeling E., Schiffrers K., Fohrmann T., Urbach C. *PhenoFlex - an integrated model to predict spring phenology in temperate fruit trees*. Agricultural and Forest Meteorology. 2021; Vol. 307: P. 108491. DOI:10.1016/j.agrformet.2021.108491.
7. Kaziev M.A., SHahmirzoev R.A. *Sovershenstvovanie sortimenta intensivnogo sadovodstva Dagestana [Improving the assortment of intensive horticulture in Dagestan]* Agrarnaya nauka = Agricultural science. 2021. 10: 94-98. – DOI 10.32634/0869-8155-2021-353-10-94-98. (In Russ.).
8. Darbyshire R., Farrera I., Martinez-Lüscher J., Berenhauser Leite G., Mathieu V., El Yaacoubi A., Legave J.-M. *A global evaluation of apple flowering phenology models for climate adaptation*. Agricultural and Forest Meteorology. 2017; Vol. 240: 67–77. DOI:10.1016/j.agrformet.2017.03.021.
9. Delgado A., Egea J.A., Luedeling E., Dapena E. *Agroclimatic requirements and phenological responses to climate change of local apple cultivars in northwestern Spain*. Scientia Horticulturae. 2021; Vol. 283: 110093. DOI:10.1016/j.scienta.2021.110093.
10. Szalay L., Bakos J., Toth M. *Frost hardiness of apple generative buds during dormancy*. Acta agriculturae Slovenica .118(4):1. DOI:10.14720/aas.2022.118.4.2677
11. Chernuckaya E. A. *Kompleksnaya ocenka selekcionnogo materiala yabloni raznoj ploidnosti dlya sozdaniya ustojchivyh k parshe genotipov: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata sel'skohozyajstvennyh nauk [Comprehensive assessment of apple tree breeding material of different ploidy to create scab-resistant genotypes: dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences]* Krasnodar. 2024: 165. (In Russ.).
12. Kulikov M., Shibkov E., Isaev E., Azarov A., Sajdl R. *Prostranstvenno - vremennye zakonomernosti reakcii razlichnyh drevesnyh vidov na klimaticheskie faktory na yuge Kyrgyzstana [Spatial and temporal patterns of the response of various tree species to climatic factors in southern Kyrgyzstan]* Centralnoaziatskij zhurnal issledovaniya klimata i ustojchivogo razvitiya = Central Asian Journal of Climate Research and Sustainable Development. 2023. 2(2): 98-128. <https://doi.org/10.29258/CAJSCR/2023-R1.v2-2/98-128.rus> (In Russ.).
13. Repyah M.V. *Izmenchivost nastupleniya fenologicheskikh faz u yabloni v botanicheskom sadu im. Vs.M. Krutovskogo [Variability of phenological phases in apple trees at the Krutovsky Botanical Garden]*. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Scientific Research Journal. 2022. 3-2(117): 46-50. DOI 10.23670/IRJ.2022.117.3.046. – EDN UNIXLQ. (In Russ.).
14. Sedov, E.N., Korneeva S.A., Yanchuk T.V. *Yablochnyj kalendar iz sortov selekcii VNIISPK [Apple calendar from cultivars of VNIISPK breeding]* Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Michurinsk State Agrarian University. 2022. 1(68): 8-13. (In Russ.).
15. Matveeva R. N., Butorova O. F., Eliseev S. G. *Vsevolod Mihajlovich Krutovskij – sozdatel' botanicheskogo sada [Vsevolod Mikhailovich Krutovsky - the creator of the botanical garden]* // Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal area. – 2024. – T. XLII, No 6. p. 7–10. (In Russ.).
16. Bratilova N.P., Gerasimova O.A., Moksina N.V. *Biologicheskaya produktivnost' krupnoplodnyh sortov yabloni, vyrashchivaemoj v otkrytoj i stelyushchejsya forme v botanicheskom sadu im. VS. M. Krutovskogo [Biological productivity of large-fruited apple varieties grown in open and creeping form in the Krutovsky Botanical Garden]*. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. 2024: 148. ISBN 978-5-86433-956-5. (In Russ.).

17. *Arhivy i statistika pogody po gorodam Rossii. Krasnoyarskij kraj. Krasnoyarsk* [Archives and weather statistics for Russian cities. Krasnoyarsk Region. Krasnoyarsk]. Spravochno-informacionnyj portal = Reference and information portal. URL: https://climate-energy.ru/weather/archive_weather_295740.php. (date of access 09.02.2025). (In Russ.).
18. Krasova N.G. Bioresursnaya kollekcija yabloni VNIISPK formirovanie, izuchenie, ispol'zovanie [VNIISPK Apple Tree Bioresource Collection: Formation, Study, and Use]. Orel: Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (VNIISPK). 2024: 256. ISBN 978-5-6049204-7-3. (In Russ.).
19. Repyah M.V., Usova E.A. *Sezonnyj ritm razvitiya yabloni na kollekcionnom uchastke i nizhnej terrase Botanicheskogo sada im. Vs. M. Krutovskogo* [Seasonal rhythm of apple tree development in the collection area and on the lower terrace of the V. M. Krutovsky Botanical Garden] Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukcija drevesnyh rasteni j= [Gardening, seed growing, introduction of woody plants. 2023. 26: 140-143. (In Russ.).
20. Krasova N.G., Ozherel'eva Z.E., Galasheva A.M., Makarkina M.A., Lupin M.V. Ocenka adaptivnosti i kachestva plodov sortov yabloni dlya intensivnyh sadov [Assessment of adaptability and fruit quality of apple varieties for intensive orchards] Trudy po prikladnoj botanike, genetike i selekcii = Works on applied botany, genetics and breeding. 2022. 183(4): 48-59. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-4-48-59>. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ Моксина Наталья Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры селекции и озеленения ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1387-0529>, e-mail: n.moksina2010@yandex.ru.

Братилова Наталья Петровна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой селекции и озеленения ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2918-9690>, e-mail: nbratilova@yandex.ru.

Information about the authors

✉ Natalya V. Moksina – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, Department of selection and gardening, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1387-0529>, e-mail: n.moksina2010@yandex.ru.

Natalya P. Bratilova – Dr. Sci. (Agric.), Professor, Head of Department of selection and gardening, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarskii rabochii prospect, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2918-9690>, e-mail: nbratilova@yandex.ru

✉ – Для контактов /Corresponding author



Эффективность выделения ДНК из листьев дуба черешчатого (*Q. robur* L.) и хвои сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Екатерина И. Трапезникова¹✉, katena.trapeznikova.02@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7429-9551>
Сергей М. Матвеев¹, lisovod@bk.ru <https://orcid.org/0000-0001-8532-1484>

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

Выделение высококачественной ДНК из тканей древесных растений, таких как дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), затруднено из-за высокого содержания вторичных метаболитов (полифенолов, полисахаридов), которые коэкстрагируются с нуклеиновыми кислотами и ингибируют последующие молекулярно-генетические анализы.

Целью данной работы являлась сравнительная оценка эффективности различных методов выделения ДНК (модифицированного СТАВ-протокола, СТАВ-протокола с доочисткой и двух коммерческих наборов: SKYSuper Plant Genomic DNA Kit и D-Plants) для получения препаратов, пригодных для дальнейших исследований.

Качество препаратов ДНК оценивали спектрофотометрически по соотношениям оптических плотностей A260/A280 (для оценки чистоты от белков) и A260/A230 (для оценки чистоты от полисахаридов и полифенолов), электрофоретически (для визуализации целостности ДНК и наличия примесей) и количественно. Функциональную пригодность проверяли с помощью ПЦР-амплификации.

Для хвои сосны обыкновенной набор D-Plants продемонстрировал стабильно высокое качество препаратов ($A_{260}/A_{280} = 1.87 \pm 0.33$; $A_{260}/A_{230} = 1.95 \pm 0.09$) и 100% эффективность ПЦР. Набор SKYSuper показал наибольший выход ДНК, но признаки деградации ($A_{260}/A_{280} > 2.0$) и низкую эффективность ПЦР (<50%). Классический СТАВ-метод оказался самым экономичным, но требовал обязательной дополнительной очистки от полисахаридов. Для листьев дуба черешчатого только набор D-Plants позволил получить ПЦР-пригодную ДНК (80% эффективность), однако выход был крайне низким (0.15 мкг), что обусловило высокую стоимость получения 1 мкг ДНК. Остальные методы, включая СТАВ с доочисткой, не позволили получить функциональный препарат (0% эффективность ПЦР).

Набор D-Plants является оптимальным решением для задач, требующих высокого качества ДНК (ПЦР, секвенирование) для сосны. Для массового скрининга сосны предпочтительнее классический СТАВ-метод с последующей очисткой. Для дуба черешчатого ни один из методов не показал удовлетворительного результата, что указывает на необходимость применения специализированных протоколов, включающих этапы предварительной обработки РVP.

Ключевые слова: выделение ДНК, методы экстракции, дуб черешчатый, сосна обыкновенная, СТАВ-метод, доочистка колонками Biolabmix, SKYSuper Plant Genomic DNA Kit, D-Plants, полисахариды, полифенолы, оптическая плотность

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-16-20047, <https://rscf.ru/project/24-16-20047/>

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Трапезникова, Е. И. Эффективность выделения ДНК из листьев дуба черешчатого (*Q. robur* L.) и хвои сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.). / Е. И. Трапезникова, С. М. Матвеев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 82–100. – Библиогр.: с. 96–99 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/6>

Поступила 01.06.2025. **Пересмотрена** 02.09.2025. **Принята** 15.09.2025. **Опубликована онлайн** 25.09.2025.

Article

Efficiency of DNA extraction from the leaves of the common oak (*Q. robur* L.) and the needles of the Scots pine (*P. sylvestris* L.)

Ekaterina I. Trapeznikova ¹✉, katena.trapeznikova.02@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0003-7429-9551>
Sergey M. Matveev ¹, lisovod@bk.ru <https://orcid.org/0000-0001-8532-1484>

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

Abstract

The extraction of high-quality DNA from tissues of woody plants, such as English oak (*Quercus robur* L.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), is challenging due to the high content of secondary metabolites (polyphenols, polysaccharides). These compounds co-extract with nucleic acids and inhibit downstream molecular genetic analyses. The aim of this work was a comparative evaluation of the efficiency of different DNA extraction methods (a modified CTAB protocol, a CTAB protocol with additional cleanup, and two commercial kits: the SKYSuper Plant Genomic DNA Kit and D-Plants) for obtaining DNA samples suitable for further research. The quality of the DNA preparations was assessed spectrophotometrically by the absorbance ratios A260/A280 (to assess protein contamination) and A260/A230 (to assess contamination by polysaccharides and polyphenols), electrophoretically (to visualize DNA integrity and the presence of impurities), and quantitatively. Functional suitability was tested via PCR amplification. For Scots pine needles, the D-Plants kit demonstrated consistently high quality of the preparations (A260/A280 = 1.87 ± 0.33; A260/A230 = 1.95 ± 0.09) and 100% PCR efficiency. The SKYSuper kit showed the highest DNA yield but also signs of degradation (A260/A280 > 2.0) and low PCR efficiency (<50%). The classic CTAB method was the most economical but required mandatory additional cleanup for polysaccharides. For English oak leaves, only the D-Plants kit yielded PCR-suitable DNA (80% efficiency), although the yield was very low (0.15 µg), resulting in a high cost per 1 µg of DNA. The other methods, including CTAB with cleanup, failed to produce a functional preparation (0% PCR efficiency). The D-Plants kit is the optimal solution for tasks requiring high-quality DNA (PCR, sequencing) for pine. For large-scale screening of pine, the classic CTAB method with subsequent cleanup is preferable. For English oak, none of the tested methods yielded a satisfactory result, indicating the need to develop specialized protocols including PVP pre-treatment steps.

Keywords: DNA extraction, extraction methods, *Quercus robur* (English oak), *Pinus sylvestris* (Scots pine), CTAB method, additional purification using Biolabmix columns, SKYSuper Plant Genomic DNA Kit, D-Plants, polysaccharides, polyphenols, optical density

Funding: The study was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-16-20047, <https://rscf.ru/project/24-16-20047/>.

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

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

For citation: Trapeznikova E. I., Matveev S. M. (2025). Efficiency of DNA extraction from leaves of common oak (*Q. robur* L.) and needles of Scots pine (*P. sylvestris* L.). Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 82-100 (in Russian). DOI: : <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/6>

Received 01.06.2025. **Revised** 02.09. 2025. **Accepted** 15.09.2025. **Published online** 25.09.2025.

Введение

В современных исследованиях лесных сообществ особое значение приобрели высокочувствительные молекулярно-генетические методы, такие как секвенирование нового поколения (NGS), ПЦР и AFLP-анализ. Эффективность этих методов критически зависит от качества ДНК, которая должна обладать высокой чистотой и целостностью, исключая любые проявления деградиационных процессов [1].

Однако выделение высококачественной ДНК из растительного материала сопряжено со значительными трудностями, обусловленными особенностями биохимического состава клеток. Вторичные метаболиты, полисахариды и полифенолы, высвобождающиеся в процессе гомогенизации тканей, выступают сильными ингибиторами молекулярно-биологических реакций. Они ко-преципитируют с нуклеиновыми кислотами, вызывают их фрагментацию и подавляют активность ферментов, что приводит к получению препаратов, непригодных для дальнейшего анализа [2, 3].

Стандартные протоколы выделения ДНК требуют трудоёмкой адаптации под конкретные виды растений, их ткани и фенологическое состояние, что особенно проблематично при массовых исследованиях [3]. Наиболее эффективным для трудных объектов остаётся модифицированный СТАВ-метод [4], включающий PVP-40 для связывания полифенолов [5] и β-меркаптоэтанол для ингибирования окисления и денатурации белков [6].

Однако классический СТАВ-метод отличается многоэтапностью, длительной инкубацией и использованием токсичных reagents, что снижает выход ДНК. Коммерческие наборы часто экономически нецелесообразны для крупных исследований [7]. Особые сложности возникают при работе с растениями, богатыми вторичными метаболитами (например, дубом), где полисахариды, полифенолы и пигменты коэкстрагируются с ДНК, образуя прочные комплексы и снижая качество препарата [5, 8].

Для нейтрализации загрязнений традиционно применяют поливинилпирролидон (PVP) и β-меркаптоэтанол. PVP (оптимально 2%) связывает полифенолы через водородные связи с карбонильной группой, предотвращая их окисление и связывание

с ДНК. Повышение концентрации PVP нежелательно из-за увеличения вязкости буфера, затрудняющей пипетирование и разделение фаз, а также по экономическим соображениям [9, 10].

β-Меркаптоэтанол действует как восстановитель, разрывая дисульфидные связи белков, инактивируя ДНКазы и полифенолоксидазы и предотвращая окисление полифенолов в хиноны. Однако его применение сопряжено с высокой токсичностью, риском ингибирования ПЦР и коррозии оборудования, что требует строгих мер безопасности [11].

Биохимический состав листьев дуба (*Quercus*) характеризуется высоким уровнем присутствия вторичных метаболитов фенольной природы, преимущественно флавоноидов и конденсированных танинов. Концентрация последних варьирует между различными видами дубов, достигая максимального значения в молодых листовых пластинках и постепенно уменьшаясь по мере старения листа [12]. Хвоя сосен (р. *Pinus*) также отличается повышенным содержанием полисахаридов и фенольных соединений, отрицательно сказывающихся на качестве выделяемой ДНК. Полисахариды склонны к совместному выпадению в осадок вместе с молекулами ДНК, ухудшая её последующую идентификацию и количественную оценку, а также затрудняя проведение процедур амплификации. Фенольные соединения вступают в прочные комплексы с ДНК после разрушения клеточных мембран, препятствуя полноценному извлечению высококачественного генетического материала [13].

Выбор оптимального метода экстракции требует комплексной оценки: качества получаемой ДНК, длительности протокола, стоимости реагентов, возможности автоматизации и пригодности для последующих молекулярно-генетических исследований [14].

Цель работы заключалась в сравнительном анализе эффективности методов сорбционной очистки (на примере коммерческих наборов) и органической экстракции (модифицированный метод СТАВ) для выделения геномной ДНК из листьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Материалы и методы

Биобезопасность

Меры безопасности при работе с хлороформом: Все манипуляции с хлороформом и смесью хлороформ-изоамиловый спирт (24:1) проводились в ламинарном шкафу с включенной вентиляцией. Использовались средства индивидуальной защиты: перчатки, лабораторный халат и защитные очки. Отработанные органические фазы собирались в специально маркированные емкости для последующей утилизации в соответствии с правилами техники безопасности.

Работа с бромистым этидием: Все манипуляции с гелями, содержащими бромистый этидий (БЭ), проводились в перчатках. Отработанные гели и растворы собирались в специально маркированный герметичный контейнер для последующей обезвреживания и утилизации в соответствии с установленными правилами.

Сбор и хранение биоматериала: В качестве биоматериала использовались листья дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и хвоя сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Отбор проб проводили с десяти внешне здоровых взрослых деревьев каждого вида (биологические повторности, $n=10$). С каждого дерева было отобрано по две пробы (технические повторности). Листья и хвою собирали в стерильные пробирки, мгновенно замораживали в жидком азоте и хранили при -80°C до проведения экстракции ДНК.

Метод выделения ДНК с использованием СТАВ-буфера (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide) был первоначально разработан в 1987 году Doyle J.J. и DOYLE J.L. [4]. Изначально методика использовалась преимущественно для выделения ДНК из растений, обладающих большим количеством вторичных метаболитов, таких как полисахариды и полифенолы. Сегодня традиционные процедуры с использованием СТАВ дополняются новыми модификациями, включая использование специализированных коммерческих наборов для доочистки, что делает процедуру более удобной и быстрой. Нарастающую популярность приобретают комбинированные (с использованием традиционных методов и коммерческих наборов методы), поэтому кроме

модификации СТАВ метода была использована доочистка препарата ДНК на колонках.

Была поставлена задача усовершенствовать протокол выделения ДНК, направленного на снижение концентрации РВП и исключение токсичного β -меркаптоэтанола без потери эффективности. Это сделает метод более безопасным, экологичным и экономичным, что актуально для крупномасштабных скрининговых исследований.

Для экстракции использовали ряд коммерческих методик и модификацию стандартного СТАВ-метода [4]. Всего протестировано 4 варианта экстракции ДНК: модифицированный СТАВ-метод, СТАВ-метод с доочисткой на колонках Biolabmix, наборы «SKY Super Plant Genomic DNA Kit» (SkyGen, Россия) (коммерческий набор 1) и «D-Plants» (Biolabmix, Россия) (коммерческий набор 2). Для каждого из десяти биологических образцов (дерева) каждого вида экстракция каждым методом проводилась в 3 технических повторностях.

После выделения препараты ДНК хранили при температуре -80°C и использовали для дальнейших манипуляций.

Состав используемого СТАВ-буфера: (2% (масса / объем) ЦТАБ; 0.1 М Tris-HCl (pH 8.0); 1.4 М NaCl; 20 mM EDTA (pH 8.0); 2 % (масса / объем) PVP).

Ниже приводятся протоколы экстракции ДНК разными методами.

СТАВ-метод:

1. Навеску образца ткани 30 мг растирали с подогретым до 65°C СТАВ-буфером в объеме 750 мкл с использованием ступки и пестика. Гомогенат переносили в 1,5 мл пробирку.
2. Инкубировали 40 минут при 65°C в термостате, периодически помешивая.
3. Отобрали надосажок, перенесли в новую пробирку, добавили равный объем смеси хлороформа и изоамилового спирта (24:1), центрифугировали 5 минут 13000 об/мин при охлаждении до 4°C .
4. Добавляли равный объем хлороформа.

- Повторили центрифугирование при тех же параметрах, отобрали надосадов, перенесли в новую пробирку
- Добавили 500 мкл холодного изопропанола, тщательно перемешали, не допуская энергичного встряхивания.
- Инкубировали пробы при -20°C ночь.
- Центрифугировали 10 мин 13000 об/мин при 4°C
- Надосадов удаляли и осадок дважды промывали 70% этиловым спиртом (500 мкл)
- Осадок просушивали и растворяли в 50 мкл деионизированной воды. Выделенную ДНК хранили при -80°C и использовали для дальнейших манипуляций.

Выделение с использованием коммерческого набора 1

Гомогенизировали 30 мг пробы с 600 мкл Буфера ГПС, добавляли 10 мкл РНКазы А (10 мг/мл), помещали в 1,5 мл микроцентрифужную пробирку и инкубировали 15 минут в термостате при 65°C. Добавляли к образцу 150 мкл буфера ГПА, перемешивали на вортексе в течение 1 минуты и центрифугировали в течение 5 минут. Перенесли супернатант в Фильтрационную колонку ЦС (в 2,0 мл собирательной пробирке), центрифугировали 1 минуту, перенесли фильтрат в новую 1,5 мл микроцентрифужную пробирку. Добавили равный объем этанола (96 - 100%) к образцу. Переместили раствор вместе с осадком на колонку СР2 (в 2,0 мл собирательной пробирке). Центрифугировали в течение 1 минуты, слили супернатант. Добавили 550 мкл Буфера РД. Центрифугировали 1 минуту. Слили супернатант. Добавили 700 мкл Буфера ПВ, центрифугировали 1 минуту. Слили супернатант. Повторили промывку буфером ПВ. Центрифугировали пустую спин-колонку 2 минуты. Слили супернатант и инкубировали при комнатной температуре в течение 10 минут для полного высыхания мембраны. Поместили спин-колонку СР2 в новую 1,5 мл собирательную пробирку. Нанесли в центр мембраны колонки 50 - 100 мкл Буфера ТБ, инкубировали колонку 3-5 минут при комнатной температуре. Центрифугировали 2 минуты для сбора очищенной ДНК.

Выделение с использованием коммерческого набора 2:

Гомогенизировали 30 мг пробы с 750 мкл буфера для лизиса LB. Инкубировали 10 минут, 65°C. Центрифугировали лизат 5 мин, 12000 gcf. Отобрали супернатант и перенесли в чистую пробирку. Добавили 5 мкл РНКазы А. Инкубировали 10 мин, 37°C. Добавили равный объем буфера для нанесения на колонку ВВ. Инкубировали 1 минуту при комнатной температуре. Нанесли 800 мкл лизата на колонку. Центрифугировали 30 с, 12000 gcf. Удалили фильтрат. Нанесли на колонку 500 мкл буфера для промывки WB. Центрифугировали 30 с, 12000 gcf. Удалили фильтрат. Повторно нанесли на колонку 500 мкл буфера для промывки WB. Центрифугировали 30 с, 12000 gcf. Удалили фильтрат. Центрифугировали колонку 3 мин, 12000 gcf для полного удаления буфера WB. Перенесли колонку в новую микропробирку на 1.5-2 мл. Нанесли на центр фильтра колонки 100 мкл буфера для элюции EB. Инкубировали 3 мин при комнатной температуре. Центрифугировали 1 мин, 10000 gcf.

Доочистка ДНК на колонках:

Выделенную с использованием СТАВ-буфера ДНК очищали с использованием набора спин-колонок из коммерческого набора 2.

Добавили равный объем буфера для нанесения на колонку ВВ. Инкубировали 1 минуту при комнатной температуре. Нанесли 800 мкл лизата на колонку. Центрифугировали 30 с, 12000 gcf. Удалили фильтрат. Нанесли на колонку 500 мкл буфера для промывки WB. Центрифугировали 30 с, 12000 gcf. Удалили фильтрат. Повторно нанесли на колонку 500 мкл буфера для промывки WB. Центрифугировали 30 с, 12000 gcf. Удалили фильтрат. Центрифугировали колонку 3 мин, 12000 gcf для полного удаления буфера WB. Перенесли колонку в новую микропробирку на 1.5-2 мл. Нанесли на центр фильтра колонки 100 мкл буфера для элюции EB. Инкубировали 3 мин при комнатной температуре. Центрифугировали 1 мин, 10000 gcf.

Визуализацию препаратов ДНК проводили с помощью электрофореза в 2% агарозном геле (1× TBE, 0.2 мкг/мл бромистого этидия). Образцы (5 мкл) смешивали с 1 мкл нагрузочного буфера и разделяли при 100 В в течение 30 минут. Результаты визуализировали на УФ-трансиллюминаторе (312 нм).

Концентрацию ДНК измеряли на флуориметре Qubit 2.0 с набором dsDNA HS Assay Kit. Чистоту препаратов определяли спектрофотометрически на приборе Nanophotometer P330, оценивая соотношения A260/280 и A260/230. Приемлемыми считались образцы с соотношением A260/280 в диапазоне 1.8–2.0 и A260/230 \geq 2.0, что указывает на отсутствие значительных примесей белков и солей соответственно.

Количественную ПЦР участка гена GAPDH проводили на амплификаторе LightCycler 480 II (Roche Diagnostics, Швейцария). Реакционная смесь объемом 25 мкл содержала: 5 мкл 5X qPCRmix-HS SYBR (Евроген, Россия), 1 мкл прямого и 1 мкл обратного праймеров (конечная концентрация 0.4 мкМ каждый), 2 мкл ДНК-матрицы и 16 мкл воды.

Реакцию проводили по следующему протоколу:

- 1) Инкубация при 95°C в течение 5 минут;
 - 2) 38 циклов, каждый из которых включал:
 1. Денатурацию при 95°C на протяжении 20 секунд;
 2. Отжиг праймеров при 60°C на протяжении 30 секунд;
 3. Элонгацию при 72°C в течение 30 секунд;
- Использованы специфичные праймеры для консервативного участка гена GAPDH

Для сосны:

1. PsGAPDH-F, GGACAGTGGAGCATCAT
2. psGAPDH-R, AACCGAATACAGCAACAGA

Для дуба:

3. QrGAPDH-F, GGACCAATGGAGTTTGAG
4. QrGAPDH-R, CGTACTTGTCGTACCATG

Статистическая обработка данных:

Для каждого набора данных проводились:

1. Расчёт среднего арифметического (M)
2. Расчёт стандартного отклонения (SD) для оценки вариабельности между биологическими повторностями
3. Расчёт стандартной ошибки среднего (SEM) для оценки точности предсказания генерального среднего

4. Проверка нормальности распределения: осуществлялась с помощью теста Шапиро-Уилка при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

5. Проверка гомогенности дисперсий: выполнялась с использованием теста Левена.

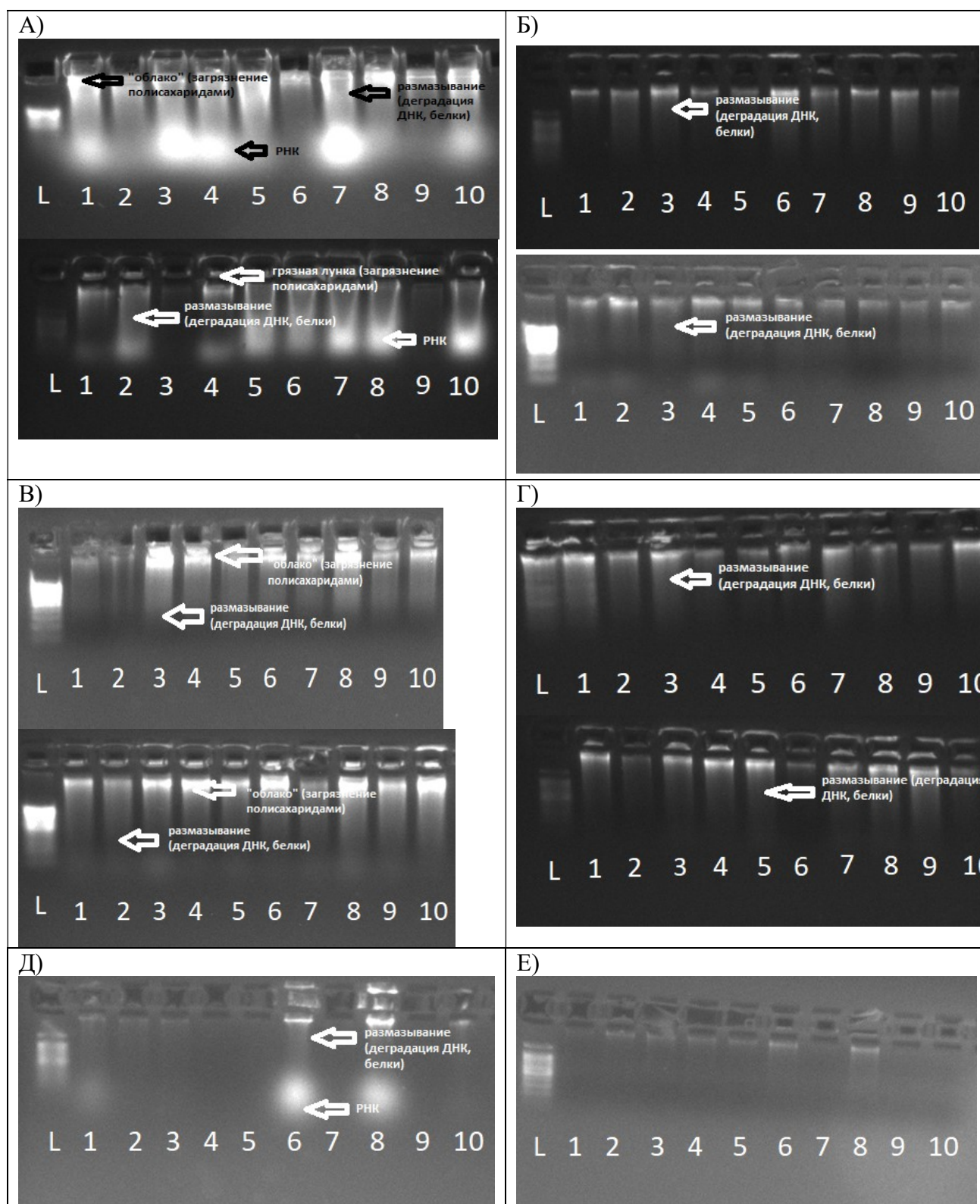
6. Сравнение нескольких групп: при нормальном распределении и гомогенности дисперсий применялся однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим пост-хок тестом Тьюки для множественных сравнений.

Различия между группами считались статистически значимыми при $p < 0,05$. Статистический анализ проводился с использованием программы Stadia 6.0.

Результаты

Анализ электрофореграмм (Рисунок 1) показал, что для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) наиболее чистые препараты получены при использовании коммерческого набора D-Plants, а также при дополнительном этапе очистки ДНК на колонках. Без дополнительной очистки наблюдалось выраженное загрязнение полисахаридами, признаки деградации ДНК, наличие белков ("размазывание" дорожек геля) и контаминация РНК. При выделении ДНК из сосны коммерческим набором 1 было выявлено загрязнение полисахаридами, признаки деградации ДНК и наличие белков ("размазывание" дорожек геля).

Для дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) наивысшее качество продемонстрировали методы с доочисткой на колонках и с использованием коммерческого набора 2. Электрофореграмма образцов, выделенных без доочистки и с помощью коммерческого набора 1, выявляла большее количество загрязнений: признаки деградации ДНК, наличие белков ("размазывание" дорожек геля) и контаминация РНК. Без дополнительной очистки так же наблюдалось выраженное загрязнение полисахаридами.



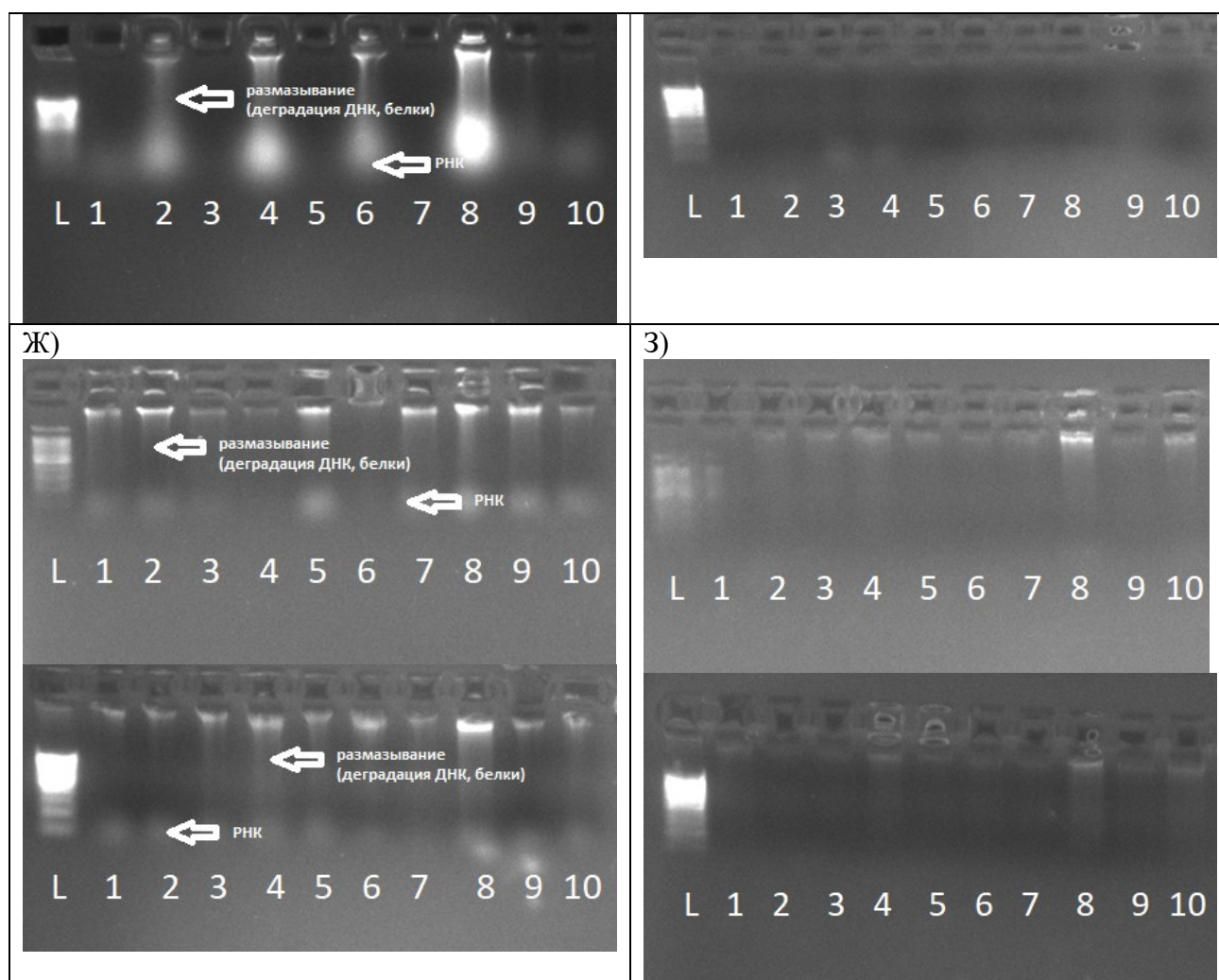


Рис.1 Электрофореграммы образцов ДНК: сосна А-Г, дуб Д-З, выделенных а) модификация СТАВ-буфера; б) доочистка на колонках; в) Коммерческий набор 1; г) Коммерческий набор 2; д) модификация СТАВ-буфера; е) доочистка на колонках; ж) Коммерческий набор 1; з) Коммерческий набор 2. L – маркер молекулярного веса.

Таблица 1

Концентрация ДНК нг/мкл в образцах, полученных из листьев дуба и хвои сосны

Об- ра- зец, по- рода	СТАВ-метод			СТАВ-метод с до- очисткой колон- ками			Коммерческий набор 1			Коммерческий набор 2		
	Сред нее	SD	SEM	Сред нее	SD	SEM	Сред нее	SD	SEM	Сред нее	SD	SEM
Су- хая хвоя сосн ы	72,19	$\pm 1,6$ 9	$\pm 0,5$ 3	43	$\pm 1,5$ 6	$\pm 0,4$ 9	98,80	$\pm 2,1$ 3	$\pm 0,6$ 7	81,88	$\pm 2,2$ 9	$\pm 0,7$ 2

Све- жие ли- стья дуба	7,66	$\pm 1,1$ 9	$\pm 0,3$ 7	2,41	$\pm 0,5$ 8	$\pm 0,1$ 8	6,29	$\pm 0,8$ 4	$\pm 0,2$ 6	2,92	$\pm 0,6$ 1	$\pm 0,1$ 9
------------------------------------	------	----------------	----------------	------	----------------	----------------	------	----------------	----------------	------	----------------	----------------

Концентрация препаратов ДНК представлена в Таблице 1.

Для сосны наивысшую концентрацию ДНК обеспечил коммерческий набор 1, продемонстрировав статистически значимое преимущество перед методом с доочисткой ($p = 0,003$). Также высокие показатели концентрации были достигнуты при использовании СТАВ-метода и коммерческого набора 2. При этом метод с доочисткой показал достоверно более низкую концентрацию по сравнению со всеми другими протоколами ($p < 0,001$). Статистически значимых различий между эффективностью базового СТАВ-метода и коммерческого набора 2 не выявлено ($p = 0,087$).

Для дуба наименее эффективными оказались метод с доочисткой и коммерческий набор 2, которые показали достоверно более низкую концентрацию ДНК по сравнению с базовым СТАВ-методом ($p < 0,001$). При этом не было выявлено значимых различий между эффективностью СТАВ-метода и коммерческого набора 1 ($p = 0,312$). Оба этих метода продемонстрировали статистически значимое преимущество по сравнению с методом с доочисткой ($p = 0,047$).

Оценку оптической плотности ДНК проводили спектрофотометрически по соотношениям A260/A280 и A260/A230 (таблица 2). Оптимальными считались значения 1,8-2,0 для A260/A280 и 1,9-2,2 для A260/A230 [15].

Анализ соотношения A260/A280: Для сосны базовый СТАВ-метод показал низкое значение (1,15), указывающее на белковую контаминацию. Все методы с очисткой обеспечили приемлемые значения: СТАВ+доочистка (1,85), коммерческий набор 2 (1,87) и коммерческий набор 1 (2,01). Для дуба наблюдалась аналогичная картина: базовый СТАВ (1,25) показал низкое качество, тогда как СТАВ+доочистка (1,79) и коммерческий набор 2 (1,84) соответствовали норме. Коммерческий набор 1 показал завышенное значение (2,25), свидетельствующее о возможной деградации ДНК.

Анализ соотношения A260/A230: Для сосны СТАВ-метод (0,99) показал сильное загрязнение солями и органическими соединениями. СТАВ+доочистка (1,89), коммерческий набор 2 (1,95) и коммерческий набор 1 (2,14) показали нормальную чистоту. Для дуба базовый СТАВ (0,94) также демонстрировал низкое качество, в то время как СТАВ+доочистка (1,95) и коммерческий набор 2 (1,98) показали значения, близкие к оптимальным. Коммерческий набор 1 показал повышенное значение (2,36), что может указывать на остаточную контаминацию.

Статистический анализ подтвердил значительное превосходство методов с очисткой над базовым СТАВ-методом по обоим показателям ($p < 0,001$). Коммерческий набор 2 продемонстрировал наименьший разброс значений ($SD = 0,05$), свидетельствующий о стабильности метода.

Таблица 2

Соотношения 260/280 и 260/230 для ДНК, выделенной из различных образцов дуба и сосны

Об- ра- зец	СТАВ-метод			СТАВ-метод с до- очисткой колон- ками Biolabmix			Коммерческий набор 1			Коммерческий набор 2		
	Сред нее	SD	SE М	Сред нее	SD	SE М	Сред нее	SD	SEM	Сред нее	SD	SE М
A260/280 (1,8-2,2)												
Су- хая хвоя сосн ы	1,15	±0,3 4	±0,1 1	1,85	±0,4 9	±0,1 5	2,01	±0,82	±0,26	1,87	±0,3 3	±0,1
Све- жие ли- стья дуба	1,25	±0,4 7	±0,1 5	1,79	±0,3 9	±0,1 2	2,25	±0,37	±0,12	1,84	±0,1	±0,0 3
A260/230 (1,9-2,2)												
Су- хая хвоя сосн ы	0,99	±0,4 2	±0,1 3	1,89	±0,2 9	±0,0 9	2,14	±0,07	±0,02	1,95	±0,0 9	±0,0 3
Све- жие ли- стья дуба	0,94	±0,3 3	±0,1	1,95	±0,3 5	±0,1 1	2,36	±0,00 1	±0,000 3	1,98	±0,0 5	±0,0 2

Базовый СТАВ-метод не обеспечивает полной очистки от примесей РНК и полисахаридов в образцах дуба черешчатого, что отражается в низких значениях оптической плотности ($A_{260/280} = 1,25$; $A_{260/230} = 0,94$). Хотя использование колоночной очистки позволяет получить ДНК высокой чистоты ($A_{260/280} = 1,79$; $A_{260/230} = 1,95$), это приводит к значительному снижению выхода препарата.

Для сосны обыкновенной наивысшие количественные показатели были достигнуты при использовании коммерческих наборов 1 и 2. При этом коммерческий набор 1 показал признаки возможной деградации ДНК ($A_{260/280} = 2,01$; $A_{260/230} = 2,14$), тогда как коммерческий набор 2 продемонстрировал оптимальные значения ($A_{260/280} = 1,87$; $A_{260/230} = 1,95$). Для дуба наилучшие количественные и каче-

ственные характеристики продемонстрировал коммерческий набор 2 ($A_{260}/_{280} = 1,84$; $A_{260}/_{230} = 1,98$).

Статистический анализ подтвердил значительное превосходство всех методов с очисткой над базовым СТАВ-методом по показателям $A_{260}/_{280}$ и $A_{260}/_{230}$ ($p < 0,001$). Коммерческий набор 2 продемонстрировал наименьший разброс значений ($SD = 0,05$), что свидетельствует о стабильности этого метода.

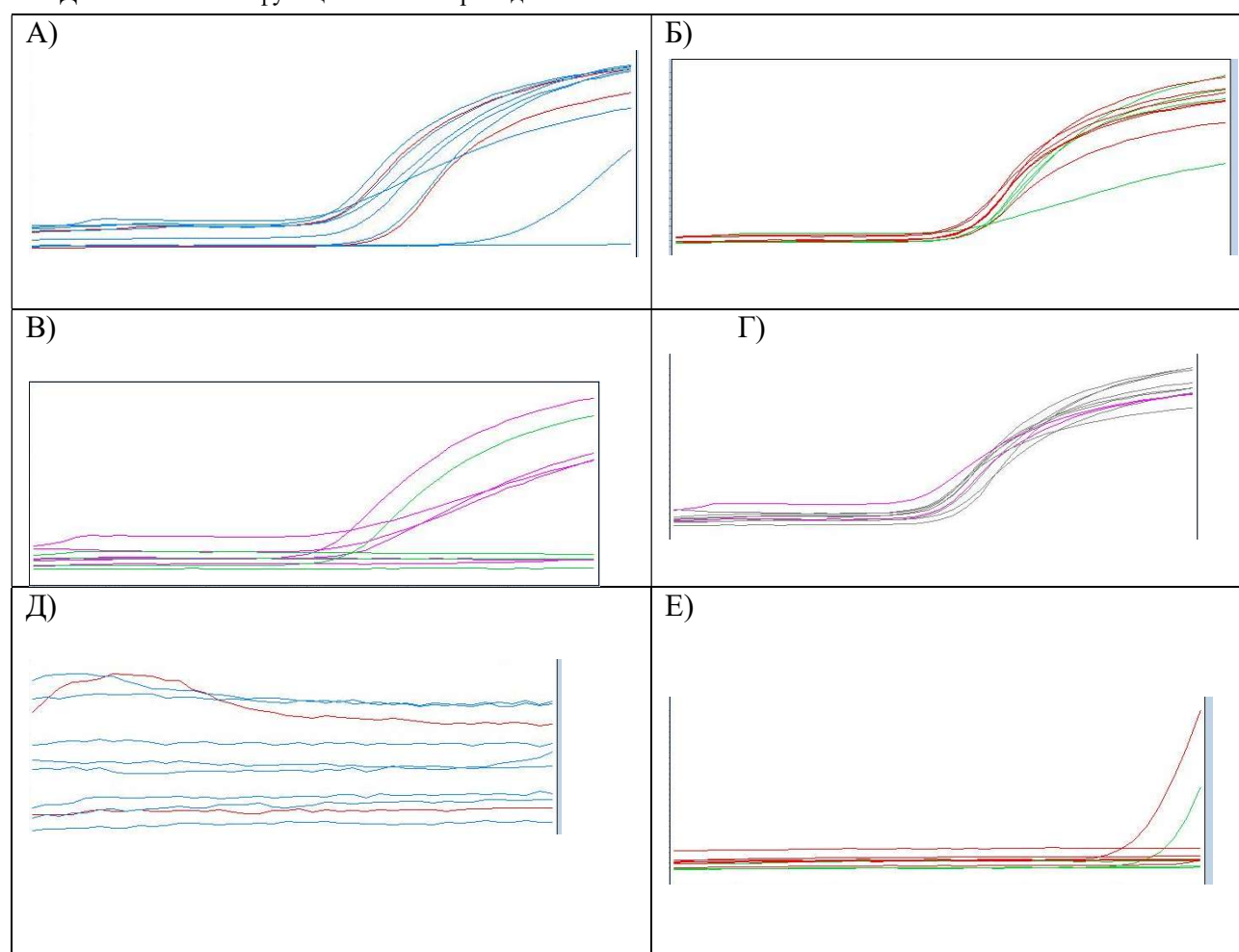
Таким образом, выбор оптимального метода выделения ДНК требует учёта баланса между качеством и количеством получаемого препарата. Для большинства применений коммерческий набор 2 демонстрирует наилучшее сочетание выхода и чистоты ДНК, в то время как базовый СТАВ-метод требует обязательной дополнительной очистки для получения пригодных для дальнейших исследований образцов.

Критическим критерием качества выделенной ДНК является её функциональная пригодность

для последующих молекулярно-генетических исследований. Проведенная ПЦР-амплификация консервативного участка гена GAPDH выявила существенные различия в эффективности различных методов выделения (рис. 2).

Для образцов ДНК сосны успешная амплификация в 100% образцов наблюдалась при использовании СТАВ-метода с доочисткой и коммерческого набора 2. Для образцов, полученных коммерческим набором 1, эффективность амплификации составила менее 50%. Образцы, выделенные базовым СТАВ-методом, показали эффективность амплификации на уровне 80%.

Для образцов ДНК дуба амплификация оказалась unsuccessful для образцов, полученных базовым СТАВ-методом, методом с доочисткой и коммерческим набором 1. Эффективная амплификация наблюдалась только для образцов, выделенных коммерческим набором 2, с эффективностью 80%.



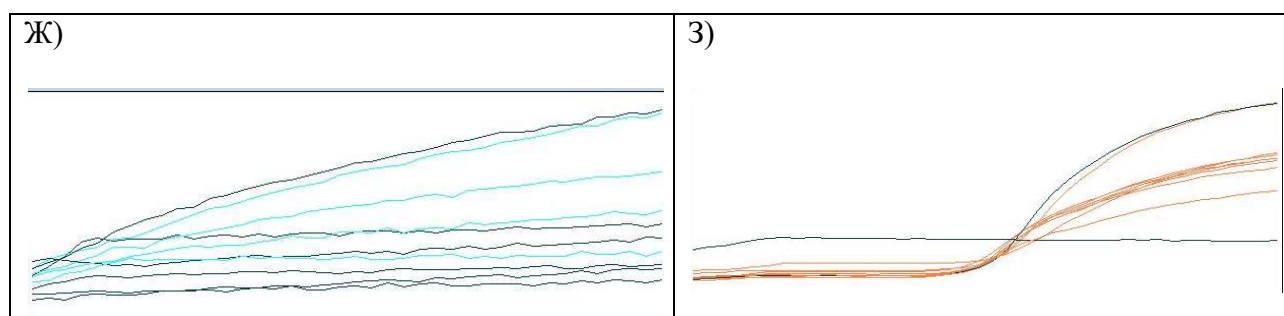


Рис. 2. Кривые амплификации продукта GAPDH с использованием ДНК сосна А-Г, дуб Д-З, выделенных а) модификация СТАВ-буфера; б) доочистка на колонках; в) SKYSuper Plant Genomic DNA Kit; г) D-Plants; д) модификация СТАВ-буфера; е) доочистка на колонках; ж) SKYSuper Plant Genomic DNA Kit; з) «D-Plants».

удовлетворительной эффективностью амплификации (<80%) исключены из анализа как не имеющие практической ценности для молекулярно-генетических исследований.

Так же была проведена оценка длительности протокола выделения и анализ экономических затрат на материалы и реагенты. (табл.3). Методы с не-

Таблица 3.

Оценка времени и средств, затраченных на выделение 20 образцов.

Метод	СТАВ-метод	СТАВ-метод с доочисткой колонками Biolab-mix	Коммерческий набор 2
Длительность протокола выделения	3 часа+инкубация в течении ночи (12 часов)	3, часа+инкубация в течении ночи (12 часов)	2 часа
Экономические затраты на выделение 20 образцов	420	4350	3950

Наиболее быстрыми методами выделения ДНК являются коммерческие наборы, позволяющие выделить ДНК за 2 часа, что существенно меньше по сравнению с использованием СТАВ-метода. Это

преимущество делает коммерческие наборы особенно привлекательными для лабораторий, работающих с большими объемами образцов.

Так же была оценена стоимость получения 1 мкг качественной ДНК (табл.4).

Таблица 4. Стоимость получения 1 мкг качественной ДНК

Метод	Стоимость 1 выделения (руб.)	Средний выход ДНК (мкг) из 30 мг образца		Эффективность ПЦР (%)		Стоимость 1 мкг качественной ДНК (руб)	
		Сосна	Дуб	Сосна	Дуб	Сосна	Дуб
СТАВ	21	3,6	0,383	80%	0%	7,29	-

СТАВ с до- очисткой	217,5	2,15	0,12	100%	0%	101,16	-
Коммерче- ский набор 2	197,5	4,1	0,15	100%	80%	48,1	1690,9

Стоимость 1 мкг качественной ДНК рассчитана по формуле: Стоимость 1 выделения / (Средний выход ДНК × (Эффективность ПЦР / 100))

Для дуба методы на основе СТАВ и коммерческий набор 1 показали нулевую эффективность амплификации, что исключает возможность расчета стоимости функциональной ДНК и делает эти методы непригодными для практического применения. Единственным эффективным методом для данного вида оказался коммерческий набор 2, однако его использование сопряжено с экстремально высокой стоимостью (1690,9 руб./мкг), обусловленной низким выходом ДНК (0,15 мкг) при значительной стоимости реактивов.

Базовый СТАВ-метод демонстрирует наилучшую экономическую эффективность с стоимостью получения 1 мкг ПЦР-пригодной ДНК всего 7,29 рубля при 80% эффективности амплификации, что делает его оптимальным выбором для массовых скрининговых исследований с большими партиями образцов. Вторым практичным решением является коммерческий набор 2, который обеспечивает 100% эффективность амплификации при стоимости 48,1 рубля за 1 мкг качественной ДНК, представляя оптимальный баланс между надежностью и экономической эффективностью.

Обсуждение

Результаты подтверждают, что дополнительная очистка ДНК на колонках является высокоэффективным способом повышения чистоты препарата, что критически важно для последующих анализов (например, ПЦР, секвенирование) [16]. Это подтверждается улучшением ключевых спектрофотометрических соотношений (A260/A230 и A260/A280), указывающих на удаление полисахаридов/полифенолов и белков, соответственно. Подобный подход доочистки или использования наборов на основе колонок используется при выделении из

зрелых листьев древесных растений, богатых вторичными соединениями [17]. Однако это достижение сопровождается неприемлемо высокими потерями выхода ДНК (до 40% для сосны и 68% для дуба), что ставит под сомнение практическую целесообразность такого подхода для многих исследований. Для работ, требующих большого количества ДНК (например, полногеномное секвенирование), такие потери могут быть критичными.

Для анализов, требующих высокой чистоты ДНК (NGS, клонирование, некоторые типы ПЦР), очистка на колонках оправдана, несмотря на количественные потери.

Проведенный экономический анализ выявил существенные различия в стоимости получения 1 мкг качественной ПЦР-пригодной ДНК (Таблица 4). Для сосны обыкновенной наименьшую стоимость обеспечил классический СТАВ-метод (7,29 руб./мкг), тогда как коммерческие наборы увеличивали стоимость в 7-20 раз. Для дуба черешчатого ситуация оказалась критической: большинство методов показали 0% эффективность ПЦР, а единственный пригодный метод (коммерческий набор 2) продемонстрировал экстремально высокую стоимость (1690,9 руб./мкг), что делает его экономически нецелесообразным.

Экономический анализ выявляет еще одну проблему: стоимость выделения ДНК коммерческими наборами в 10-17 раз превышает стоимость классического СТАВ-метода. Для лабораторий с ограниченным бюджетом и исследований, требующих обработки сотен образцов, это делает коммерческие наборы экономически нецелесообразными.

Сравнительный анализ выявил, что наиболее сбалансированные результаты по совокупности параметров (качество, выход и воспроизводимость) продемонстрировал коммерческий набор 2.

Ключевым преимуществом этого набора для сосны стала эффективная минимизация загрязнения

полисахаридами при сохранении удовлетворительного выхода ДНК. Для дуба, известного высоким содержанием интерферирующих соединений (полифенолы, полисахариды), оптимальными методами стали выделение коммерческим набором 2 и СТАВ-метод с последующей доочисткой на колонках.

Данные подходы обеспечили наилучший баланс чистоты и выхода ДНК по сравнению с другими протестированными вариантами. В отличие от коммерческого набора 1, который показал максимальную концентрацию ДНК, но одновременно — признаки деградации ДНК ($A_{260}/A_{280} > 2$) и загрязнения на электрофореграммах, коммерческий набор 2 обеспечил стабильно высокое качество препаратов.

Оба набора значительно ускоряют процесс выделения по сравнению с традиционным СТАВ-методом, что имеет преимущество для обработки больших партий образцов. коммерческий набор 2 показал себя как надежный метод для обоих видов.

Однако применение коммерческого набора 2 имеет и существенные ограничения:

1. Высокая стоимость (в 9,4 раза дороже СТАВ-метода).
2. Снижение выхода ДНК (в 2–3 раза для дуба).
3. Экономическая нецелесообразность при массовых исследованиях.

Низкая стоимость СТАВ-метода остается ключевым фактором, особенно для лабораторий с ограниченным бюджетом или при работе с очень большим количеством образцов, где стоимость реагентов становится определяющей. Использование комбинированных методов набирает популярность, так как позволяет сочетать экономичность классического метода со стандартизированной очисткой получаемого препарата ДНК [18,19]. Данное исследование подтверждает эффективность такого подхода для дуба черешчатого.

Таким образом, коммерческий набор 2 является надежным решением для задач, требующих высокого качества ДНК (ПЦР, секвенирование), но его применение должно быть взвешенным с учетом бюджета и требуемого количества DNA. Для круп-

ных проектов более оправдано использование оптимизированного СТАВ-метода с выборочной очисткой образцов.

Таким образом, в настоящее время из-за видоспецифичности и тканевых особенностей биологического материала, не существует универсального метода выделения ДНК готового к использованию без модификаций. Оптимальный выбор всегда зависит от конкретной исследовательской задачи, вида растения и доступных ресурсов. Комбинированные подходы, использующие сильные стороны разных методов, представляются особенно перспективным направлением.

На сегодняшний день наиболее перспективными признаны следующие направления:

1. Модифицированные СТАВ-протоколы, в которых стандартные буферы оптимизированы за счет повышенных концентраций поливинилпирролидона (PVP-40 до 4%) и β -меркаптоэтанола (до 4%) для эффективной нейтрализации полифенолов и предотвращения окисления [20, 21].
2. Методы на основе магнитных частиц, обеспечивающие селективное связывание нуклеиновых кислот и автоматизацию процесса, что минимизирует контаминацию и повышает чистоту конечного продукта [22].
3. Комбинированные подходы, интегрирующие этапы предварительной обработки образцов с последующей очисткой современными коммерческими наборами.

Для особо сложных объектов, таких как ткани дуба, характеризующиеся экстремально высоким содержанием полифенолов, ключевым этапом становится предварительная инкубация образца с PVP для специфического связывания мешающих соединений до начала лизиса клеток [20,21].

Заключение

Проведенное сравнительное исследование методов выделения ДНК из тканей сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) позволяет сделать следующие основные выводы, согласующиеся с полученными результатами:

1. Для сосны обыкновенной оптимальные результаты, обеспечивающие баланс между количеством, чистотой и функциональной пригодностью ДНК, продемонстрировали:

1. Классический СТАВ-метод показал наилучшую экономическую эффективность (стоимость 1 мкг качественной ПЦР-пригодной ДНК составила 7,29 руб.) и приемлемый выход (3,6 мкг), что делает его предпочтительным для массовых скрининговых исследований.

2. Коммерческий набор 2 подтвердил высокую воспроизводимость и стабильность (наименьшее SD по показателю $A260/230 = 0,09$), обеспечив чистые препараты ДНК ($A260/280 = 1,87$; $A260/230 = 1,95$), пригодные для ПЦР (100% эффективность амплификации). Это делает его рекомендуемым методом для задач, требующих высокого качества ДНК, таких как секвенирование.

2. Для дуба черешчатого, крайне сложного объекта из-за высокого содержания полифенолов:

1. Большинство протестированных методов оказались непригодны для получения ПЦР-пригодной ДНК (0% эффективность амплификации).

2. Единственным методом, позволившим получить функциональную ДНК, стал коммерческий набор 2 (80% эффективность амплификации). Однако экстремально низкий выход ДНК (0,15 мкг) и высокая стоимость набора привели к крайне высокой стоимости получения 1 мкг качественной ДНК (1690,9 руб.), что ставит под сомнение его практическую и экономическую целесообразность для рутинной работы с данным видом. Данный результат указывает на необходимость разработки и апробации

специализированных протоколов для дуба, включающих этап предварительной обработки PVP [20, 21].

Для ПЦР-анализа сосны: рекомендуется классический СТАВ-метод как наиболее экономичный и эффективный.

Для анализа, требующего высокой чистоты ДНК (NGS, клонирование): для сосны рекомендован коммерческий набор 2; для дуба необходим поиск и оптимизация альтернативных методов.

Доочистка на колонках является эффективным инструментом для повышения чистоты препаратов (значимое улучшение соотношений $A260/280$ и $A260/230$, $p < 0.001$), но приводит к значительным потерям выхода ДНК (до 40-68%), что ограничивает её применение случаями, когда количество материала не является лимитирующим фактором.

Таким образом, выбор оптимального метода выделения ДНК должен основываться на балансе между необходимым уровнем чистоты и экономическим фактором, принимая во внимание дальнейшее назначение препарата ДНК.

Заявление о конфликте интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Исследование проводилось с целью объективного сравнения коммерческих и лабораторных методов, производители коммерческих наборов не оказывали влияния на дизайн исследования, интерпретацию результатов или выводы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-16-20047, <https://rscf.ru/project/24-16-20047/>.

Список литературы

1. Галактионова У.А., Большаков В.Н., Тиходеева М.Ю., Тиходеев О.Н. Специфические проблемы при выделении геномной ДНК из растений: пути решения. Ботанический журнал. 2023; 108 (6): 603–614. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zllhzc>
2. Лубенникова М.В., Афанасьев В.А., Афанасьев К.А. Выделение ДНК – важный этап молекулярно-генетического исследования. Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2020; 2 (21). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43154546> (дата обращения: 13.09.2025).
3. De Silva S., Bentz P.C., Cagliero C. et al. Ionic liquid-assisted seed genomic DNA extraction for advanced sequencing applications. Plant Methods. 2025; 21: 97. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-025-01417-1>
4. Гучетль С.З., Золотавина М.Л., Григорьян А.А., Головатская А.В. Исследование качества ДНК для полимеразной цепной реакции, экстрагированной разными способами из подсолнечника. Масличные культуры.

2021; 1 (185). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kachestva-dnk-dlya-polimeraznoy-tsepnoy-reaktsii-ekstragirovannoy-raznymi-sposobami-iz-podsolnechnika> (дата обращения: 16.09.2025).

5. Li Z., Parris S., Saski C.A. A simple plant high-molecular-weight DNA extraction method suitable for single-molecule technologies. *Plant Methods*. 2020; 16: 38. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00582-9>

6. Kiss T., Karácsony Z., Gomba-Tóth A. et al. A modified CTAB method for the extraction of high-quality RNA from mono- and dicotyledonous plants rich in secondary metabolites. *Plant Methods*. 2024; 20: 62. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01198-z>

7. Li Z., Parris S., Saski C.A. A simple plant high-molecular-weight DNA extraction method suitable for single-molecule technologies. *Plant Methods*. 2020; 16: 38. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00582-9>

8. Heikrujam J., Kishor R., Mazumder P.B. The chemistry behind plant DNA isolation protocols. London: IntechOpen; 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.92206>

9. Бадыкова Л.А., Мударисова Р.Х., Колесов С.В. Особенности структуры и свойств гидроксипропилацетата, синтезируемой в присутствии оксида этилена и серной кислоты. *Химическая физика*. 2020; 39 (1): 88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dubiaschaya-sposobnost-okislennoy-gidroksietilsellyulozy>

10. Marín D.V., Castillo D.K., López-Lavalle L.A.B., Chalarca J.R., Pérez C.R. An optimized high-quality DNA isolation protocol for *Spodoptera frugiperda* J.E. Smith (Lepidoptera: Noctuidae). *MethodsX*. 2021; 8: 101255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101255>

11. Schenk J.J., Becklund L.E., Carey S.J., Fabre P.P. What is the "modified" CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA extraction protocol. *Applications in Plant Sciences*. 2023; 11: e11517. DOI: <https://doi.org/10.1002/aps3.11517>

12. Попова А.А., Гродецкая Т.А., Молчанов В.В., Евлаков П.М. Подбор и оптимизация методов экстракции ДНК из различного растительного материала. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2022; 1 (49): 58–71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podbor-i-optimizatsiya-metodov-ekstraksii-dnk-iz-razlichnogo-rastitelnogo-materiala>

13. Петюренко М.Ю., Камалова И.И., Сердюкова А.П. Экстракция суммарной ДНК из *Pinus sylvestris* L. при оценке полиморфизма с использованием SSR- и RAPD-маркеров. *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2021: 13–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47147777>

14. Попова А.С., Старухина А.О., Зайцев В.Г. Сравнительный анализ методов ускоренного выделения ДНК из растительного материала. *Научно-агрономический журнал*. 2021; 2 (113): 67–73. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-metodov-uskorennoy-vydeleniya-dnk-iz-rastitelnogo-materiala>

15. Файзуллина Р.М., Гафурова Р.Р., Маркелов В.А., Викторов В.В., Данилко К.В. Опыт использования и оценка эффективности коммерческого набора для экстракции геномной ДНК из цельной размороженной крови. *Медицинский вестник Башкортостана*. 2022; 17 (5): 101. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-ispolzovaniya-i-otsenka-effektivnosti-kommercheskogo-nabora-dlya-ekstraksii-genomnoy-dnk-iz-tselnoy-razmorozhennoy-krovi>

16. Guillardín L., MacKay J.J. Comparing DNA isolation methods for forest trees: quality, plastic footprint, and time-efficiency. *Plant Methods*. 2023; 19: 111. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-023-01086-y>

17. Langsiri N., Meyer W., Irinyi L., Worasilchai N., Pombubpa N., Wongsurawat T., Jenjaroenpun P., Luangsa-Ard J.J., Chindamporn A. Optimizing fungal DNA extraction and purification for Oxford Nanopore untargeted shotgun metagenomic sequencing from simulated hemoculture specimens. *mSystems*. 2025; 10: e0116624. DOI: <https://doi.org/10.1128/msystems.01166-24>

18. Terzi Aksoy B., Ateş Sönmezoglu Ö. Comparison of modified DNA isolation methods for the detection of GMO in processed foods. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*. 2022; 5 (3): 546–561. DOI: <https://doi.org/10.38001/ijlsb.1166275>

19. Лубенникова М.В., Афанасьев В.А., Афанасьев К.А. Выделение ДНК — важный этап молекулярно-генетического исследования. *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2020; 2 (21). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43154546>

20. Dar G.J., Nazir R., Wani S.A., Farooq S., Aziz T., Albekairi T.H. Optimizing a modified cetyltrimethylammonium bromide protocol for fungal DNA extraction: insights from multilocus gene amplification. *Open Life Sciences*. 2025; 20: 20221006. DOI: <https://doi.org/10.1515/biol-2022-1006>

21. Schenk J.J., Becklund L.E., Carey S.J., Fabre P.P. What is the "modified" CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA extraction protocol. *Applications in Plant Sciences*. 2023; 11. DOI: <https://doi.org/10.1002/aps3.11517>

22. Ye X., Lei B. The current status and trends of DNA extraction. *BioEssays*. 2023; 45: e2200242. DOI: <https://doi.org/10.1002/bies.202200242>

References

1. Galaktionova U.A., Bolshakov V.N., Tikhodeeva M.Yu., Tikhodeev O.N. Spetsificheskie problemy pri vydelenii genomnoy DNK iz rasteniy: puti resheniya [Specific problems in the isolation of genomic DNA from plants: solutions]. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 2023;108(6):603–614. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zllhzc>

2. Lubennikova M.V., Afanasyev V.A., Afanasyev K.A. Vydelenie DNK – vazhnyy etap molekulyarno-geneticheskogo issledovaniya [DNA extraction is an important stage of molecular genetic research]. *Elektronnyi nauchno-metodicheskii zhurnal Omskogo GAU = Electronic Scientific and Methodological Journal of Omsk SAU*. 2020;2(21). (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43154546>

3. De Silva S., Bentz P.C., Cagliero C. et al. Ionic liquid-assisted seed genomic DNA extraction for advanced sequencing applications. *Plant Methods*. 2025;21:97. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-025-01417-1>

4. Guchetl S.Z., Zolotavina M.L., Grigoryan A.A., Golovatskaya A.V. Issledovanie kachestva DNK dlya polimeraznoy tsepnoy reaktsii, ekstragirovannoy raznymi sposobami iz podsolnechnika [Study of the quality of DNA for polymerase chain reaction extracted by different methods from sunflower]. *Maslichnye kultury = Oil Crops*. 2021;1(185). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kachestva-dnk-dlya-polimeraznoy-tsepnoy-reaktsii-ekstragirovannoy-raznymi-sposobami-iz-podsolnechnika>

5. Li Z., Parris S., Saski C.A. A simple plant high-molecular-weight DNA extraction method suitable for single-molecule technologies. *Plant Methods*. 2020;16:38. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00582-9>

6. Kiss T., Karácsony Z., Gomba-Tóth A. et al. A modified CTAB method for the extraction of high-quality RNA from mono- and dicotyledonous plants rich in secondary metabolites. *Plant Methods*. 2024;20:62. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01198-z>

7. Li Z., Parris S., Saski C.A. A simple plant high-molecular-weight DNA extraction method suitable for single-molecule technologies. *Plant Methods*. 2020;16:38. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00582-9>

8. Heikrujam J., Kishor R., Mazumder P.B. The chemistry behind plant DNA isolation protocols. London: IntechOpen; 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.92206>

9. Badykova L.A., Mudarisova R.Kh., Kolesov S.V. Osobennosti struktury i svoystv gidroksietilsellyulozy, sintetiziruemoy v prisutstvii oksida etilena i sernoy kisloty [Features of the structure and properties of hydroxyethyl cellulose synthesized in the presence of ethylene oxide and sulfuric acid]. *Khimicheskaya fizika = Chemical Physics*. 2020;39(1):88. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dubyaschaya-sposobnost-okislennoy-gidroksietilsellyulozy>

10. Marín D.V., Castillo D.K., López-Lavalle L.A.B., Chalarca J.R., Pérez C.R. An optimized high-quality DNA isolation protocol for *Spodoptera frugiperda* J.E. Smith (Lepidoptera: Noctuidae). *MethodsX*. 2021;8:101255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101255>

11. Schenk J.J., Becklund L.E., Carey S.J., Fabre P.P. What is the "modified" CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA extraction protocol. *Applications in Plant Sciences*. 2023;11:e11517. DOI: <https://doi.org/10.1002/aps3.11517>

12. Popova A.A., Grodeckaya T.A., Molchanov V.V., Evlakov P.M. Podbor i optimizatsiya metodov ekstraktsii DNK iz razlichnogo rastitelnogo materiala [Selection and optimization of DNA extraction methods from various plant

materials]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie = Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2022;1(49):58–71. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podbor-i-optimizatsiya-metodov-ekstraktsii-dnk-iz-razlichnogo-rastitelnogo-materiala>

13. Petyurenko M.Yu., Kamalova I.I., Serdyukova A.P. Ekstraktsiya summarnoy DNK iz Pinus sylvestris L. pri otsenke polimorfizma s ispolzovaniem SSR- i RAPD-markerov [Extraction of total DNA from Pinus sylvestris L. for polymorphism assessment using SSR and RAPD markers]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2021:13–25. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47147777>

14. Popova A.S., Starukhina A.O., Zaitsev V.G. Sravnitel'nyy analiz metodov uskorennoy vydeleniya DNK iz rastitelnogo materiala [Comparative analysis of methods for accelerated DNA extraction from plant material]. Nauchno-agronomicheskii zhurnal = Scientific Agronomic Journal. 2021;2(113):67–73. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitel'nyy-analiz-metodov-uskorennoy-vydeleniya-dnk-iz-rastitelnogo-materiala>

15. Fayzullina R.M., Gafurova R.R., Markelov V.A., Viktorov V.V., Danilko K.V. Opyt ispolzovaniya i otsenka effektivnosti kommercheskogo nabora dlya ekstraktsii genomnoy DNK iz tselnoy razmorozhennoy krovi [Experience of use and evaluation of the effectiveness of a commercial kit for genomic DNA extraction from whole thawed blood]. Meditsinskiy vestnik Bashkortostana = Medical Bulletin of Bashkortostan. 2022;17(5):101. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-ispolzovaniya-i-otsenka-effektivnosti-kommercheskogo-nabora-dlya-ekstraktsii-genomnoy-dnk-iz-tselnoy-razmorozhennoy-krovi>

16. Guillardín L., MacKay J.J. Comparing DNA isolation methods for forest trees: quality, plastic footprint, and time-efficiency. Plant Methods. 2023;19:111. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-023-01086-y>

17. Langsiri N., Meyer W., Irinyi L., Worasilchai N., Pombubpa N., Wongsurawat T., Jenjaroenpun P., Luangsa-Ard J.J., Chindamporn A. Optimizing fungal DNA extraction and purification for Oxford Nanopore untargeted shotgun metagenomic sequencing from simulated hemoculture specimens. mSystems. 2025;10:e0116624. DOI: <https://doi.org/10.1128/msystems.01166-24>

18. Terzi Aksoy B., Ateş Sönmezoglu Ö. Comparison of modified DNA isolation methods for the detection of GMO in processed foods. International Journal of Life Sciences and Biotechnology. 2022;5(3):546–561. DOI: <https://doi.org/10.38001/ijlsb.1166275>

19. Lubennikova M.V., Afanasyev V.A., Afanasyev K.A. Vydelenie DNK — vazhnyy etap molekulyarno-geneticheskogo issledovaniya [DNA extraction is an important stage of molecular genetic research]. Elektronnyi nauchno-metodicheskii zhurnal Omskogo GAU = Electronic Scientific and Methodological Journal of Omsk SAU. 2020;2(21). (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43154546>

20. Dar G.J., Nazir R., Wani S.A., Farooq S., Aziz T., Albekairi T.H. Optimizing a modified cetyltrimethylammonium bromide protocol for fungal DNA extraction: insights from multilocus gene amplification. Open Life Sciences. 2025;20:20221006. DOI: <https://doi.org/10.1515/biol-2022-1006>

21. Schenk J.J., Becklund L.E., Carey S.J., Fabre P.P. What is the "modified" CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA extraction protocol. Applications in Plant Sciences. 2023;11. DOI: <https://doi.org/10.1002/aps3.11517>

22. Ye X., Lei B. The current status and trends of DNA extraction. BioEssays

Сведения об авторах

✉ Трапезникова Екатерина Игоревна – ассистент кафедры Лесной генетики, биотехнологии и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7429-9551>, e-mail: katena.trapeznikova.02@mail.ru

Матвеев Сергей Михайлович – доктор биол. наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8532-1484>, e-mail: lisovod@bk.ru

Information about the authors

✉ *Ekaterina I. Trapeznikova* – assistant at the Department of Forest Genetics, Biotechnology and Plant Physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7429-9551>, e-mail: katena.trapeznikova.02@mail.ru

Sergey M. Matveev - doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Forestry, Forest Inventory and Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8532-1484>, e-mail: lisovod@bk.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/7>

УДК 630*43:504.05:911.2



Оценка антропогенных факторов, влияющих на возникновение пожароопасной ситуации в лесах на территории Центральной лесостепи

Василий А. Славский¹✉, slavskiyva@yandex.ru, 0000-0002-6579-0344

Алексей Н. Водолажский¹, vod.a@list.ru; 0000-0003-0847-3462

Алексей В. МIRONENKO¹, alexeymironenko66@gmail.com; 0009-0006-4668-8527

Екатерина И. Майер¹✉, mayer99ks@yandex.ru; 0000-0002-5984-4430

Максим В. Ларионов², m.larionow2014@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0834-2462>

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

²ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Российская Федерация

Антропогенные факторы лесопожарного риска являются определяющими при возникновении пожароопасной ситуации в лесах, поскольку более 90% лесных пожаров возникает по вине человека. Однако эта группа факторов учитывается не в полном объеме при определении класса природной пожарной опасности. Основной причиной поверхностного учета вышеуказанных факторов в лесных насаждениях является сложность их определения и контроля. В связи с этим, целью работы является разработка элементов технологических решений, направленных на оценку и учет антропогенных факторов риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах для совершенствования системы дистанционного лесопожарного мониторинга. Объектами исследования являлись лесные насаждения, произрастающие на территории Центральной лесостепи, характеризующиеся преобладанием сосны обыкновенной. При оценке лесопожарных рисков антропогенного характера проанализировано местоположение и размеры населенных пунктов, наличие точек интересов населения, а также параметры дорожной сети, которые оказывают влияние на возникновение пожаров. В результате проведенной работы предложен методический подход определения антропогенных факторов лесопожарного риска на дистанционной основе с целью корректировки класса природной пожарной опасности в лесах. Установлены зоны воздействия дорожно-тропиночной сети, рекреационных объектов и населенных пунктов на лесные насаждения, произрастающие на территории Центральной лесостепи. Установлено, что существующая система лесопожарного мониторинга, несмотря на использование современных средств, требует совершенствования с учетом выявленных взаимосвязей. Рекомендуется дальнейшее изучение влияния различных видов рекреационной нагрузки на состояние лесных насаждений и разработка адресных мер по снижению пожарных рисков, связанных с посещением лесов населением.

Ключевые слова: лесопожарный мониторинг, лесные экосистемы, антропогенное воздействие, охрана лесов, дистанционные методы

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ ФЗУР-2024-0002) «Разработка технологических решений,

направленных на повышение эффективности лесопожарного мониторинга и детализацию оценки последствий лесных пожаров в условиях Центральной лесостепи».

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


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Оценка антропогенных факторов и рекреационных показателей насаждений, влияющих на возникновение пожароопасной ситуации в Центральной лесостепи / В. А. Славский, А. Н. Водолажский, А. В. Мироненко, Е. И. Майер, М. В. Ларионов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 101–120. – Библиогр.: с. 115–119 (22 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/7>


Поступила 14.03.2025. *Пересмотрена* 31.08.2025. *Принята* 15.09.2025. *Опубликована онлайн* 25.09.2025.


Article

Assessment of anthropogenic factors influencing the occurrence of fire hazard in forests in the territory of the Central forest-steppe

*Vasiliy A. Slavskiy*¹ ✉, slavskiyva@yandex.ru,  0000-0002-6579-0344

*Aleksey N. Vodolazhskiy*¹, vod.a@list.ru;  0000-0003-0847-3462

*Aleksey V. Mironenko*¹, alexeymironenko66@gmail.com;  0009-0006-4668-8527

*Ekaterina I. Mayer*¹ ✉, mayer99ks@yandex.ru;  0000-0002-5984-4430

*Maxim V. Larionov*², m.larionow2014@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0834-2462>

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

²*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH University), Volokolamskoe shosse, 11, Moscow, 125080, Russian Federation*

Abstract

Anthropogenic factors of forest fire risk are decisive in the occurrence of a fire hazardous situation in forests, since more than 90% of forest fires occur due to human fault. However, this group of factors is not fully taken into account when determining the class of natural fire hazard. The main reason for the superficial consideration of the above factors in forest stands is the complexity of their definition and control. In this regard, the aim of the work is to develop elements of technological solutions aimed at assessing and taking into account anthropogenic risk factors for the occurrence of a fire hazardous situation in forests to improve the system of remote forest fire monitoring. The objects of the study were forest stands growing in the territory of the Central forest-steppe, characterized by the predominance of Scots pine. When assessing anthropogenic forest fire risks, the location and size of settlements, the presence of points of interest of the population as well as road network parameters that affect the occurrence of fires were analyzed. As a result of the work, a methodical approach to determining anthropogenic factors of forest fire risk on a remote basis was proposed in order to adjust the class of natural fire hazard in forests. The zones of influence of the road and path network, recreational facilities and settlements on forest plantations growing in the Central forest-steppe were determined. It was determined that about half of all fires in the studied objects occur at a distance of up to 50 m from roads that allow free movement of the population. It was found that the existing forest fire monitoring system, despite the use of modern means, requires improvement taking into account the identified relationships. It is recommended to further study the impact of various types of recreational load on the condition of forest stands and to develop targeted measures to reduce fire risks associated with population visits to forests.

Keywords: *forest fire monitoring, forest ecosystems, anthropogenic impact, forest protection, remote sensing methods*

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUR-2024-0002) “Development of technological solutions aimed at increasing the efficiency of forest fire monitoring and detailing the assessment of the consequences of forest fires in the Central Forest-Steppe”.

Acknowledgments: The authors thank the referees for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of Interest: The authors have declared no conflict of interest.

For citation: Slavskiy V. A., Vodolazhskiy A. N., Mironenko A. V., Maier E. I., Larionov M. V. Assessment of anthropogenic factors and recreational indicators of plantings influencing the occurrence of a fire hazard situation in the Central forest-steppe. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 101-120 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/7>

Received 14.03.2025. *Revised* 31.08.2025. *Accepted* 15.09.2025. *Published online* 25.09.2025.

Введение

Антропогенные факторы являются определяющими при оценке риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах, что находит подтверждение в работах ведущих специалистов в области лесной пирологии [1, 2, 3 и др.]. Более 90% лесных пожаров происходит по вине человека [4]. Однако эта группа факторов риска при определении класса природной пожарной опасности в лесах в действующих нормативных и правовых документах учитывается недостаточно [5, 6]. Так например, в действующей классификации природной пожарной опасности лесов³, оценка антропогенных факторов, влияющих на пожарную опасность, ограничивается следующим: «Пожарная опасность устанавливается на класс выше: для лесных участков, примыкающих к автомобильным дорогам общего пользования и к железным дорогам». Не в полном объеме учитываются расположение объектов лесопожарных рисков и особенности ландшафта, оказывающие существенное влияние на возникновение пожаров [5, 7]. Основной причиной поверхностного учета выше-

указанных факторов при определении класса природной пожарной опасности в лесных насаждениях является сложность их контроля.

Фактор антропогенного влияния на возникновение пожароопасной ситуации в лесах связан с присутствием человека, являющегося основной причиной возгорания [8]. Это присутствие может быть обусловлено производственной необходимостью, но чаще всего оно связано с пребыванием в лесу в рекреационных целях. Различные виды рекреации на территории лесного фонда, обусловленные степенью доступности и привлекательности этих участков, оказывают различное по своей силе воздействие на лесные насаждения.

Изучением данного вопроса занимались ведущие отечественные и зарубежные ученые [6, 9-14 и мн. др.]. В данных работах предлагается ряд технологических решений, позволяющих учитывать влияние антропогенных и экологических факторов на риск возгорания, что критически важно для точной оценки пожарной опасности.

Для снижения количества лесных пожаров используются как системы регулярной оценки объемов мертвой фитомассы [15, 16], так и системы

³ Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 5 июля 2011 г. № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классифи-

кации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/902289183>

оценки рисков возникновения и развития пожара (моделирование, наземный мониторинг, спутниковые данные, беспилотные авиационные системы (БАС) и др.) [17-20]. Однако существующая в настоящее время система лесопожарного мониторинга и система превентивного управления пожарной опасностью охраны лесов от пожаров в целом, не являются достаточно эффективными.

Всё это требует планомерного внедрения научных разработок, технологических и практико-ориентированных решений, а также использования современных методов, не уступающих мировому уровню в области автоматизации и цифровизации лесной отрасли. Согласно «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»⁴, на период ближайших лет приоритетами научно-технологического развития России должны стать направления, позволяющие обеспечить получение научных и научно-технических результатов на основе интенсивного перехода к передовым цифровым и информационно-коммуникационным технологиям, в т.ч. дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ).

С учетом современных требований в области цифровизации лесной отрасли, в ближайшее время при проведении лесоучетных работ должны быть сформированы цифровые векторные карты и лесоустроительные планшеты расположения территории лесничеств, что позволит выполнить оценку лесопожарных рисков на всей площади лесничества на повыделной основе⁵.

Для оценки лесопожарных рисков первостепенным моментом является учет антропогенных факторов, т.е. фактической реализации рекреационного потенциала в процессе реального посещения отдыхающими этой территории. При этом, оценка рекреационного качества объекта проводится не повсеместно, а для конкретных лесных участков, предназначенных для рекреационного использования и переданных в аренду для осуществления этих целей,

в ходе составления для них проектов освоения лесов, где оценивается весь рекреационный объект в целом. Большие по площади лесные участки, переданные для осуществления рекреационной деятельности, включающие значительное количество различающихся лесотаксационных выделов, ввиду их оценки в целом не дают необходимой подробности оценки лесопожарных рисков. Таким образом, для охвата территории лесничества потребуются дополнительные объемы работ по проведению рекреационной оценки для всех лесных участков, что трудно реализуемо.

С учетом всего сказанного, можно сделать вывод о нецелесообразности применения общепринятой методики оценки рекреационного качества объекта в целом для определения лесопожарных рисков, что требует внедрения новых методических подходов и использования дополнительных оценочных критериев. Предлагаемый методический подход определения уровня лесопожарного риска на дистанционной основе, позволяет выявить количественные характеристики антропогенных факторов и скорректировать значение класса природной пожарной опасности в лесах.

Целью работы является разработка элементов технологических решений, направленных на оценку и учет антропогенных факторов риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах для совершенствования системы дистанционного лесопожарного мониторинга.

Материалы и методы

К лесопожарным рискам антропогенного характера относятся транспортная доступность территории, близость лесного участка к населенным пунктам (включая плотность населения), наличие точек интересов (турбазы, рекреационные объекты, поляны, привлекательные места отдыха и т.д.). Для анализа и учета комплекса антропогенных факторов необходима разработка технико-методологических

⁴ Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305071057/titles/64U0IK>

⁵ «Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» - URL: <https://docs.cntd.ru/document/557309575>

решений, для их интеграции в общую систему лесопожарного мониторинга.

Объекты исследования.

Объектами исследования с лесоводственной точки зрения являлись лесные насаждения, произрастающие на территории Центральной лесостепи (на примере Бобровского, Сомовского, Новоусманского, Давыдовского, Пригородного и Теллермановского лесничеств Воронежской области), характеризующиеся преобладанием сосны обыкновенной. При оценке лесопожарных рисков антропогенного характера проанализировано местоположение и размеры населенных пунктов, рекреационных объектов, а также параметры дорожной сети, которые оказывают влияние на возникновение пожаров.

Материалы исследования. В основе методического подхода содержатся данные ресурса OpenStreetMap, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет, что позволяет использовать SRTM снимки, загруженные из открытого источника (<https://www.openstreetmap.org/#map=5/61.26/76.20>).

Интеграция этих сведений в общую систему мониторинга позволяет получить детальную достоверную информацию о частоте использования существующих автомобильных дорог, интенсивность доступа к точкам рекреационных интересов и т.д., что повлечет за собой существенную корректировку класса природной пожарной опасности в лесах. Для расчета расстояний до мест возникновения пожаров от объектов лесопожарного риска использованы географические координаты из материалов отчетных форм Рослесхоза, приведенные в реестре лесных пожаров (форма 1-ЛЮ) за 2018-2023 гг. по наиболее горимым лесничествам Воронежской области: Бобровское, Сомовское, Новоусманское, Давыдовское, Пригородное и Теллермановское, а также иные сведения о состоянии и структуре лесного фонда, предоставленные Министерством лесного хозяйства Воронежской области.

Методы исследования

Работа по оцифровке границ участковых лесничеств, квартальной сети и выделов выполнялась в программе QGIS – версия 3.28.13. В качестве основы использовались геопривязанные векторные слои территорий изучаемых лесничеств. Заполнение атрибутивной таблицы векторных слоёв осуществлялось автоматически с использованием апробированной ранее авторской методики [21] и специально разработанного программного обеспечения, позволяющего экспортировать данные из текстового формата таксационных описаний в формат DBF [22]. Алгоритм позволяет конвертировать данные из текстового формата таксационных описаний на повыведельной основе путем посимвольного перебора данных и формирования таблицы таксационных показателей с последующей их конвертацией в формат Excel.

Геопривязка данных произведена в системе координат WGS84, что позволило выполнить согласование разнородных источников по пространственному положению.

Доступность территории определяется на основе расчёта густоты дорожной сети, с использованием данных ресурса OpenStreetMap⁶. Векторные слои созданы на основании фиксации треков GPS-навигаторов и отражают актуальные сведения о реальных перемещениях транспорта по территории лесного фонда (рисунок 1).

Определение расстояния от мест возникновения пожаров до объектов лесопожарного риска проводилось на основе известных географических координат для каждого пожара картометрическим методом с помощью программы QGIS.

Верификация дорог и GPS-треков из ресурса OpenStreetMap проводилась путем натурного обследования территории наиболее посещаемых отдыхающими кварталов Правобережного участкового лесничества Пригородного лесничества и нанесения положения всех имеющихся дорог и троп на карту. При сравнении полученных полевых данных по про-

⁶ OpenStreetMap. – URL: <https://www.openstreetmap.org>.

тяженности дорожно-тропиночной сети с материалами ресурса OpenStreetMap отклонение по всем дорогам и тропам составляло около 6 %, а по GPS-трекам — около 12%. С учетом того, что при полевых исследованиях фиксировались все, даже мало заметные тропы, данные ресурса OpenStreetMap можно считать пригодными для практического производственного применения.

При условии работы навигатора со стандартной погрешностью (в диапазоне не более 10 м) при

определении координат на местности автомобильными системами, точность оценки транспортной доступности находится в пределах статистической погрешности.

На рисунке 1 показаны автомобильные дороги, выделенные по значениям треков, по которым осуществляется интенсивное движение. Также различаются проезжие и не проезжие просеки (например, кв. 49 и 56 соответственно).

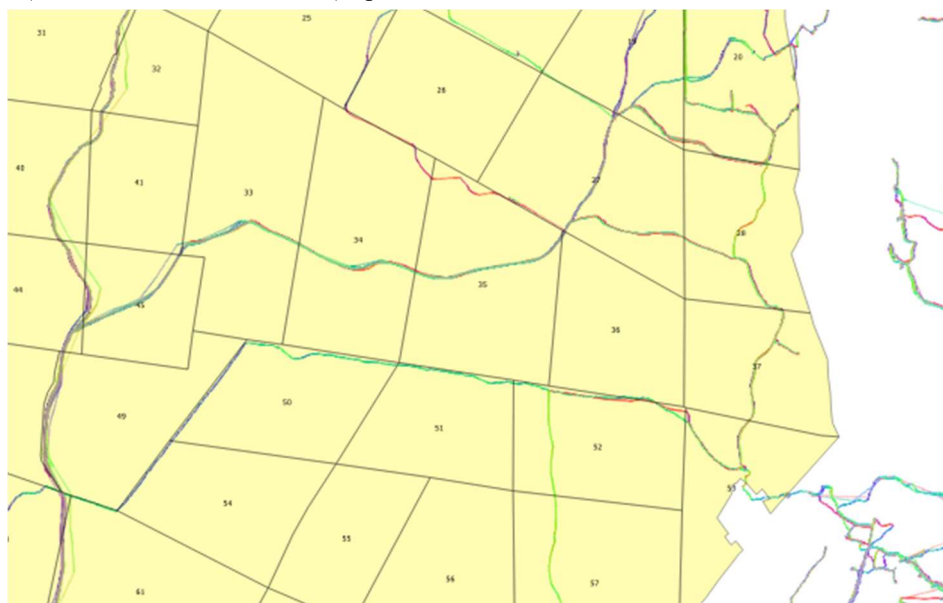


Рисунок 1 – Фрагмент карты территории Пригородного лесничества, полученной с ресурса OpenSreeMap с GPS-треками

Figure 1 – Fragment of the map of the Prigorodnoye forestry area, obtained from the OpenSreeMap resource with GPS tracks

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

С помощью программы STATISTICA 13⁷ и СтатСофт 2,5 проведен статистический последовательный анализ на основе рекомендаций Б.А. Доспехова⁸. Используются методы описательной статистики, корреляционно-регрессионного анализа, позволяющего оценить тесноту связи различных показателей, влияющих на процесс и найти зависимость между изучаемыми показателями, а также дисперсионного анализа, позволяющего определить силу

влияния действующего фактора на результирующий признак.

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния антропогенных факторов лесопожарного риска на возникновение пожароопасной ситуации разработан методический подход, базирующийся на использовании дистанционных методов и средств. Предложенный в работе методический подход, позволяющий осуществить контроль

⁷ STATISTICA версия 13.0-StatSoft. (2021).

⁸ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): учебник // М.: «Колос», 2011. – 547 с.

пожароопасной ситуации в лесных насаждениях и выполнить учет антропогенных факторов лесопожарного риска, направлен на получение детализированных сведений о природной пожарной опасности в лесах на повыведельной основе.

На первоначальном этапе производится расчёт длины дорог в пределах каждого квартала. Автоматизированным способом производится измерение общей длины и общее количество линий, пересекающих каждый полигон для исходных полигональных (кварталы) и линейных (дороги) слоев. Результирующий слой копирует объекты исходного полигонального слоя с двумя дополнительными атрибутами, содержащими длину и количество пересекающих квартал линий. Показатель густоты дорожной сети на 1 га для каждого квартала рассчитывался по формуле (1):

$$d_s = \frac{L}{S} \quad (1)$$

где d_s - густота дорожной сети, м на 1 га;

L – протяжённость лесных дорог в квартале, м;

S – площадь квартала, га.

В результате пространственного анализа векторных слоёв в QGIS, получаем поквартальные сведения о протяжённости лесных дорог, геометрической (не округлённой) площади квартала, показателя плотности дорожной сети в м/га. В таблице 1 представлен пример полученных показателей для каждого квартала.

Таблица 1

Плотность дорожной сети Левобережного участкового лесничества Пригородного лесничества (фрагмент)

Table 1

The density of the road network of the Left-bank district forestry of the Suburban forestry (fragment)

№ квартала № quarters	Протяженность дорог, м Length of roads, m	Площадь квартала, га Area of the block, ha	Плотность дорог (d_s), м/га Road density (d_s), m/ha
1	498	74.5	6.7
2	41	39.8	1.0
3	372	50.9	7.3
4	455	54.4	8.4
5	1077	45.0	23.9
6	1098	27.6	39.8
7	38	54.4	0.7
8	0	53.3	0.0
и т.д. etc.			

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Для установления оценочных градаций транспортной доступности, позволяющих ранжиро-

вать силу влияния действующего фактора на природную пожарную опасность лесных участков, составлена соответствующая шкала (таблица 2).

Таблица 2

Шкала оценки транспортной доступности лесов

Table 2

Scale of assessment of transport accessibility of forests

Диапазоны значений d_s , м/га Ranges d_s of values, m/ha	Наименование градаций транспортной доступности Naming of grades of transport accessibility
0 – 20	Труднодоступные участки леса Inaccessible areas of the forest
21 - 40	Низкая транспортная доступность Very low transport accessibility
41- 60	Средняя транспортная доступность Low transport accessibility
61- 80	Высокая транспортная доступность Average transport accessibility
81 и выше/80 and higher	Повышенная транспортная доступность High transport accessibility

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

При установлении значения транспортной доступности определяется перечень выделов, входящих в данный квартал, класс природной пожарной опасности которых корректируется в зависимости от принадлежности к соответствующей градации

(таблица 2). На основании полученных данных, приведенных в таблицах 1 и 2, возможно построение карты-схемы зонирования территории по транспортной доступности для дальнейшего использования при планировании противопожарных мероприятий (рисунок 2).

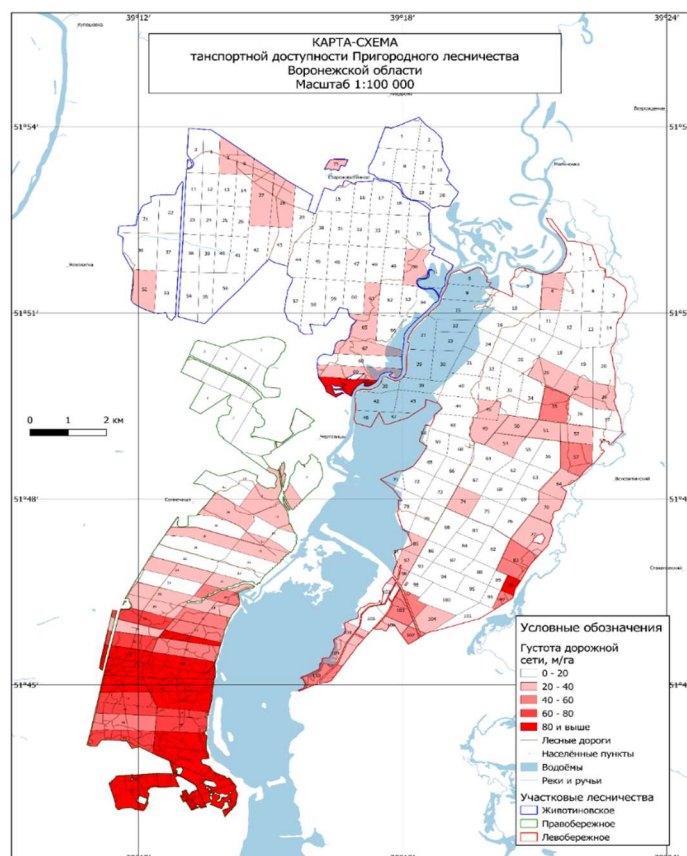


Рисунок 2 – Карта-схема зонирования территории Пригородного лесничества Воронежской области по степени транспортной доступности

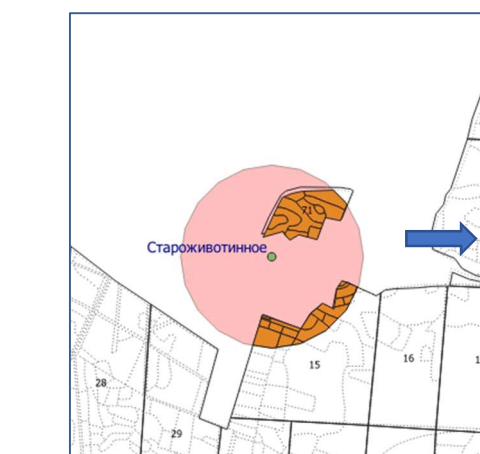
Figure 2 – Map-scheme of zoning of the territory of the Prigorodnoye forestry of the Voronezh region according to the degree of transport accessibility

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

На карте-схеме (рисунок 2) приведено функциональное зонирование территории пригородного лесничества по густоте дорожной сети. Выявлено, что лесные участки с высокой и повышенной транспортной доступностью составляют около 20% от общей площади лесничества и представляют повышенный уровень антропогенной нагрузки. Труднодоступные территории с плохо развитой дорожной сетью составляют более 50% площади лесничества.

Зоны с разной степенью транспортной доступности будут нуждаться в проведении различных объемов противопожарных мероприятий.

При оценке близости территориального расположения лесного участка к населенным пунктам с помощью инструментов пространственного анализа программы QGIS выполняется зонирование территории лесничества и определение площадей лесного фонда, входящих в ту или иную зону (рисунок 3а). В результате получается список выделов, которые входят в зоны определённого радиуса действия, входящих в зону влияния населённых пунктов (рисунок 3-в), а полученный файл в формате Excel загружается в автоматизированную систему для дальнейшего расчёта уточнённого класса природной пожарной опасности.



	А	В	С
1	Квартал	Выдел	Площадь, га
2	15	1	0.1
3	15	2	0.2
4	15	3	0.9
5	15	4	0.1
6	15	5	0.3
7	15	6	0.3
8	15	7	6.1
9	15	8	0.4
10	15	9	0.9
11	15	11	0.7
12	15	12	6.6
13	15	13	0.3
14	15	14	0.5
15	15	15	0.5
16	15	16	2.8
17	15	17	0.9
18	15	31	17.6
19	15	32	0.1
20	15	35	0.6
21	71	1	2.4
22	71	2	1.8
23	71	3	0.6
24	71	4	0.3
25	71	5	1.4
26	71	6	2.5
27	71	7	2
28	71	8	0.6
29	71	9	0.6
30	71	10	0.6

а) | а)

б) | б)

в) | в)

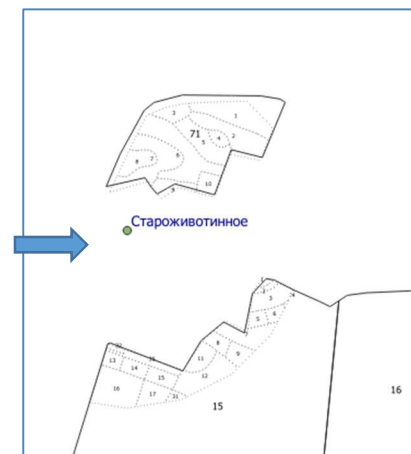


Рисунок 3 – Результат определения выделов (частей выделов) и их площадей, с повышенным риском антропогенного воздействия: а) определение размера территории, подверженной антропогенному воздействию; б) схема расположения выделов, входящих в зону, подверженной антропогенному воздействию; в) формирование списка выделов, входящих в зону радиуса действия

Figure 3 – The result of determining allotments (parts of allotments) and their areas with an increased risk of anthropogenic impact: a) determination of the size of the territory subject to anthropogenic impact; b) a diagram of the location of the allotments included in the zone subject to anthropogenic impact; c) formation of a list of allotments included in the radius of action

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результат построения буферных зон вокруг населённых пунктов на примере Пригородного лесничества Воронежской области приведен на рисунке 4.

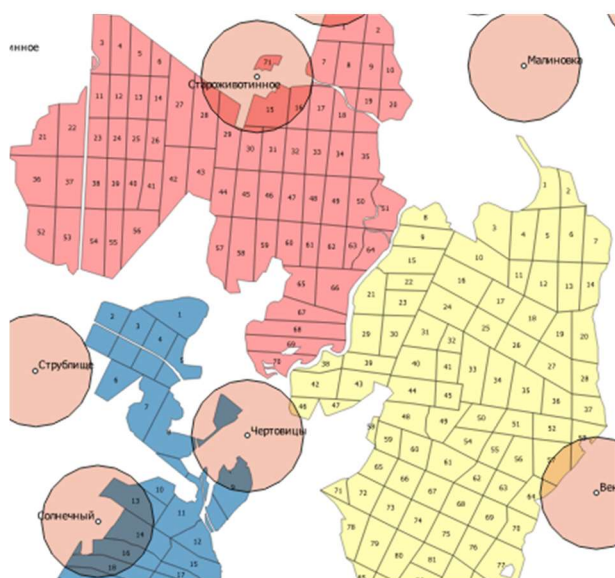


Рисунок 4 – Построение буферных зон вокруг населённых пунктов для Пригородного лесничества Воронежской области (фрагмент карты)

Figure 4 – Construction of buffer zones around populated areas for Suburban forestry in the Voronezh Region (map fragment)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Информация о лесопожарных рисках включает в себя буферизацию объектов (турбазы, места отдыха, лесные и ландшафтные поляны) и получение списка выделов, входящих в зону воздействия рекреационных объектов в соответствии с настраиваемым радиусом буфера. Данная работа производится в QGIS аналогично процессу построения буферных зон для населённых пунктов и требует наличия векторных слоёв выделов и векторного слоя с данными о местоположении рекреационных объектов.

Таким образом, предлагаемый методический подход позволит скорректировать классы природной пожарной опасности, с учетом антропогенной нагрузки на лесной участок. Основным преимуществом, по сравнению с аналогичными исследованиями, проводимыми для таежной зоны, Сибири, Дальнего Востока и других территорий с преобладанием эксплуатационных лесов, является повышенная детализация результатов, что крайне важно для малолесных регионов. Автоматизированный учет антропогенных лесопожарных рисков может выполняться в больших объемах на повыведельной основе, что позволит принимать своевременные управленческие решения в области охраны лесов.

Безусловно, крупные дороги являются основными магистралями передвижения человека с которых он может попасть на прилегающую территорию лесов в случае отсутствия ограждения вдоль этих дорог. Но, кроме крупных дорог, на пожароопасную ситуацию в лесах оказывают влияние любые проезжие дороги на территории лесов, а также велосипедные и пешеходные дороги и тропы вблизи населенных пунктов. Люди могут сходить с дорог и троп на прилегающую территорию насаждений, но основной способ их перемещения в лесу – это имеющаяся дорожно-тропиночная сеть.

Для установления зависимости между фактом возникновения лесных пожаров и наличием дорожно-тропиночной сети нами было установлено кратчайшее расстояние от точки обнаружения пожара до ближайшей дороги, кратчайшее расстояние до селитебной территории ближайшего населенного пункта и до ближайшего водного объекта (реки, озера, пруда).

Из 150 рассматриваемых участков, на которых возникли пожары, на 137 (91,3%) преобладающей породой является сосна. На 4 – береза (2,7%). По одному участку приходится на дуб, клен, осину и прочие породы (менее 1 % каждая). На 5 участках

преобладающая порода отсутствует – это не покрытые лесной растительностью земли, составляющие 3,3 % от общего количества возгораний. Так как более 90% всех пожаров происходит в насаждениях сосны, то результаты, полученные нами в ходе исследований, целесообразно распространить именно на подобные лесные участки, как фактически подверженные горению. В лиственных насаждениях (за

исключением березняков) наличие рассматриваемых факторов повышения пожарной опасности не приводит к возникновению пожаров.

При рассмотрении причин возникновения пожаров можно отметить, что в 92% случаев такой причиной в рассматриваемых лесничествах было местное население (рисунок 5). Грозы были причиной в 4-х случаях из 150 (около 3 %). В двух – линейные объекты, в четырех – огонь в леса перекинулся со смежных территорий.

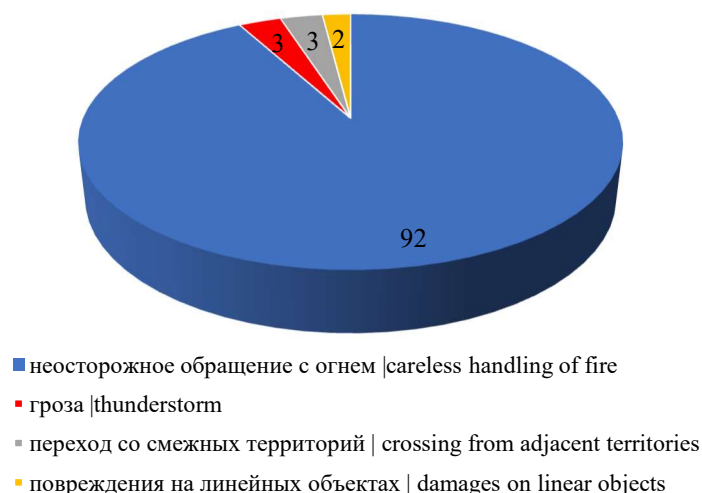


Рисунок 5 – Причины возникновения пожаров в лесах на территории Воронежской области (2018-2023 гг)

Figure 5 – Causes of forest fires in the territory Voronezh Region (2018-2023)

Источник: данные статистической отчетности Рослесхоза (форма 1-ЛО)

Source: statistical reporting data from the Federal Forestry Agency (Form 1-LO)

Из анализа данных, приведенных на рисунке 5 следует, что источником огня в лесу практически всегда (около 92% случаев) является человек, попадающий туда по дорогам.

Наличие в лесу человека, несет повышение лесопожарных рисков, но наиболее опасными являются формы рекреации, связанные с разжиганием в лесу костров. При этом возникает вопрос определения этого показателя для всей территории лесничества, поскольку в ходе таксации (в том числе и ландшафтной) он не устанавливается. Его определение возможно по наличию кострищ в местах отдыха населения, которые устанавливаются по наличию

тупиковых ответвлений GPS-треков, а также при анализе материалов лидарной съемки.

Именно для пожаров, причиной возникновения которых стало местное население, проводилось исследование связи частоты возгораний с удаленностью от дорог, а вблизи с населенными пунктами и от пешеходных троп, то есть от любых транзитных путей перемещения человека по лесу (рисунок 6).



Рисунок 6 – Фрагмент пространственного расположения мест возникновения лесных пожаров по отношению к дорожной сети на территории Пригородного лесничества

Figure 6 – Fragment of the spatial location of forest fire sites in relation to the road network in the territory of the Prigorodny forestry district

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

На рисунке 6 наглядно видно, что большинство пожаров возникают в непосредственной близости от автомобильных дорог (реже – вблизи лесных тропинок). Расстояния от места возгорания до ближайшей дороги определены с точностью 1 м.

На следующем этапе работы изучены взаимосвязи между расстояниями от выдела до объектов антропогенного риска (дорог, точек интереса и населенных пунктов) и количеством возгораний. Динамика количества пожаров в зависимости от расстояния до дороги приведена на рисунке 7.

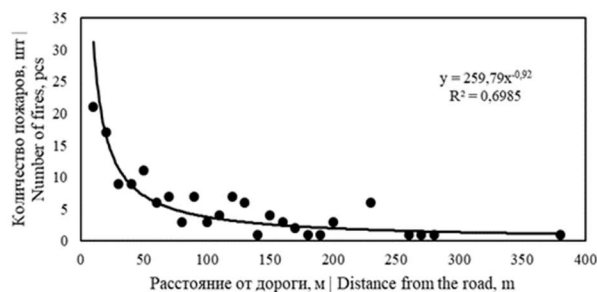


Рисунок 7 – Зависимость количества пожаров от расстояния до дороги

Figure 7 – The dependence of the number of fires on the distance to the road

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Индекс детерминации полученной нелинейной модели составляет 0,70 ($R^2 = 0,6985$), а теоретическое корреляционное отношение – 0,84. Он практически одинаков с эмпирическим корреляционным отношением $\eta = 0,85$, что соответствует высокой связи по шкале Чеддока. Полученный результат подтверждает выдвинутую гипотезу о высокой степени воздействия путей перемещения человека по лесной территории на частоту возникновения лесных пожаров.

Вероятность возгораний в лесных насаждениях на различной удаленности от дорог можно проследить по накоплению частоты пожаров (рисунок 8).

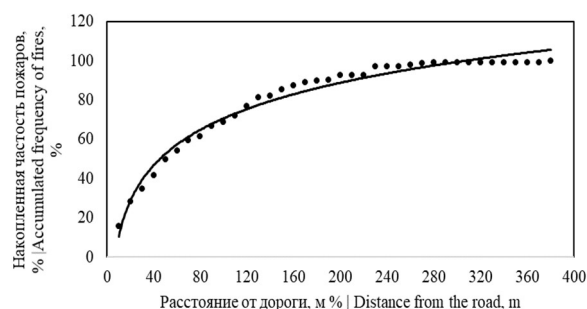


Рисунок 8 – Частота (%) возникновения пожаров на различном расстоянии от дороги

Figure 8 – Frequency (%) of fires at different distances from the road

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Анализируя полученные результаты, отраженные на рисунке 8, можно сделать вывод, что более половины всех пожаров на исследуемых объектах случаются на расстоянии до 50 м от дорог, позволяющих свободно перемещаться населению. При удаленности до 120 м наблюдается 77 % возникших возгораний, а расстояние до дороги 230 м не превышает в 97 % зарегистрированных случаев. Учитывая допустимую ошибку в 5%, можно сказать, что для рассматриваемых объектов, с учётом существующей квартальной сети защитных лесов, на расстоянии от дорог более 230 м пожары практически не возникают.

Следует отметить, что выявленная зависимость может быть использована для территорий с расположением защитных лесов в Центральной лесостепи.

Рассматривая людей, как основную причину возникновения пожаров в лесах, в совокупности с развитостью ДТС, служащей путями их передвижения, источником повышения природной пожарной опасности являются и населенные пункты, как места проживания и, соответственно, сосредоточения населения. Большое значение имеет численность населения – чем крупнее населенный пункт, тем больше вероятность негативного воздействия его населения на риск возникновения пожара в прилегающих лесах.

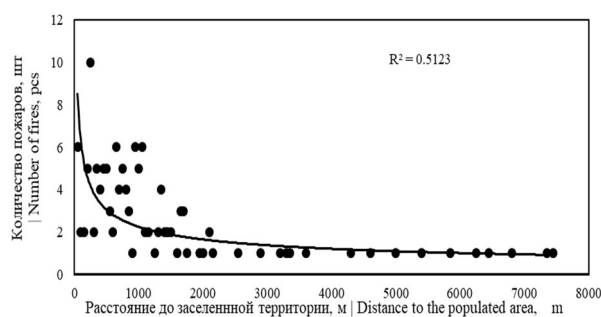


Рисунок 9 – Зависимость количества пожаров от расстояния до селитебной территории населенных пунктов

Figure 9 – The dependence of the number of fires on the distance to the residential area of settlements

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

По графику (рисунок 9) видно, что показатель точности выравнивания (R^2) в данном случае ниже соответствующего значения, установленного для зависимости частоты возникновения пожаров от расстояния до дорог, и составляет 0,51. Корреляция количества пожаров от расстояния до селитебной территории населенных пунктов имеется, но она также ниже, чем в предыдущем случае. Величина эмпирического корреляционного отношения, характеризующего тесноту нелинейной связи, $\eta = 0,71$, как и величина индекса корреляции $R = 0,716$, что соответствует высокой связи. При максимальной частоте в 10 случаев, которая отмечается на расстоянии 201 -

250 м, частота 1 шт. наблюдается в широком диапазоне классов расстояний (от 900 м до 7450 м).

В результате регрессионного анализа получено уравнение зависимости расстояния от мест обнаружения пожаров до селитебных зон ближайших населенных пунктов и соответствующего количества пожаров по формуле (2):

$$y = 48,629x^{-0,445} \quad (2)$$

где y – количество пожаров, шт.;

x – расстояние от заселенной территории населенного пункта до места возникновения пожара, м.

Рассматривая график накопления частности лесных пожаров (рисунок 10), можно отметить отсутствие большого количества пожаров в непосредственной близости (на расстоянии удаленности от дорог в 230 м) от населенных пунктов.

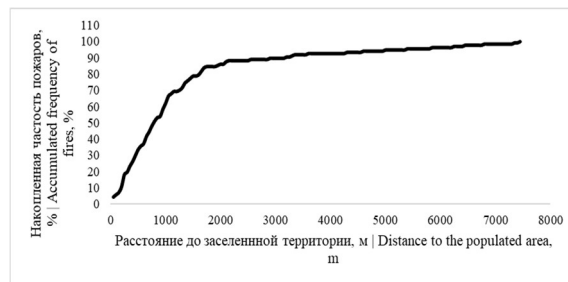


Рисунок 10 – Динамика накопленных частоты возникновения пожаров на различном расстоянии от селитебной территории населенных пунктов

Figure 10 – Dynamics of accumulated frequencies of fire occurrence at different distances from residential areas of populated areas

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

При изучении воздействия близости населенных пунктов на количество пожаров на удалении от селитебных зон до 250 м обнаружено 18,2 % всех возгораний. Стабильное увеличение накопленной частоты продолжается до величины 84,7 % на расстоянии 1750 м. Далее темпы ее изменения заметно снижаются вплоть до максимального зафиксированного расстояния в 7450 м. Необходимая точность исследований в 95% установлена на расстоянии 5000 м. На этом удалении от населенных пунктов зафиксировано 94,9% всех пожаров.

На основе проведенного анализа можно сказать, что воздействие населенных пунктов в большей степени проявляется не в непосредственной близости от селитебных территорий, а на большем удалении. При этом 85% возгораний зафиксировано на расстоянии до 1750 м, а остальные случаи встречаются до удаленности 7450 м. Очевидно, что в места пожаров на этих дистанциях человек попадает не напрямую через лесные насаждения, а по существующим дорогам и тропам, как пешком, так и с помощью транспорта.

Водные объекты (реки, озера, пруды), являясь, с одной стороны, точкой притяжения для отдыхающих, а с другой – естественным барьером для распространения пожаров, могут иметь не однозначное воздействие на риск возникновения лесных пожаров. Изучение связи между частотой возникновения пожаров и расстоянием до водных объектов поможет установить роль этого фактора в наборе существующих лесопожарных рисков.

В ходе выполненного регрессионного анализа установлено, что максимальную точность выравнивания рассматриваемых показателей дает экспоненциальное уравнение (рисунок 11). Индекс детерминации $R^2 = 0,15$, а индекс корреляции $R = 0,39$, что соответствует умеренной связи. Если не использовать конкретную функцию, а рассчитать эмпирическое корреляционное отношение (η), то его величина составит 0,51.

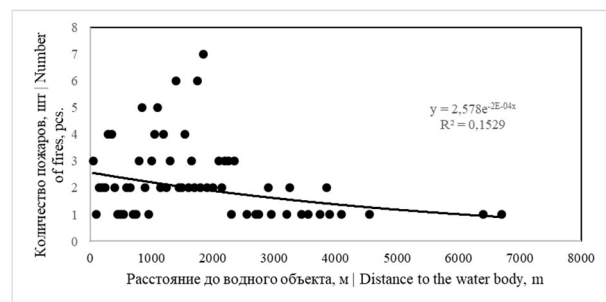


Рисунок 11 – Результаты выравнивания данных зависимости количества пожаров от расстояния до ближайшего водного объекта

Figure 11 – Results of data alignment of the dependence of the number of fires on the distance to the nearest water body according

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Характер накопления частоты возникновения пожаров по мере удаления от водных объектов тоже

значительно отличается от рассмотренных выше связей с удаленностью от дорог и населенных пунктов. На удалении от водоемов до 250 м зарегистрировано только 7,3 % случаев пожаров, при их количестве на таком же расстоянии от дорог и селитебных территорий населенных пунктов соответственно 97 % и 18,2 %. А на расстоянии до 100 м от воды зафиксировано всего 2,9 % возгораний, что ниже допустимой величины статистической ошибки. С учетом этого можно сказать, что в непосредственной близости от водоемов пожары возникают крайне редко.

Таким образом в ходе регрессионного анализа не выявлено достаточной тесноты связи между частотой возникновения лесных пожаров и удаленностью мест их возникновения от ближайших водных объектов, а на удалении до 100 м от уреза воды, с учетом допустимой ошибки выводов в 5 %, пожары вообще не случаются. Следовательно, водоемы нельзя рассматривать в качестве прямого источника повышенного риска возникновения лесных пожаров в результате их привлекательности для отдыхающего населения. Кроме того, водоемы являются естественными барьерами для распространения пожаров.

Заключение

1. Характерной проблемой материалов лесопользования, обновляемых преимущественно методом актуализации, является неактуальность данных о дорожно-тропиночной сети. Возникающие стихийные дороги рекреационного назначения, не фиксируемые на картах, формируют дополнительные риски увеличения антропогенной нагрузки и повышения класса пожарной опасности лесов.
2. Разработан методический подход для дистанционной выверенной оценки антропогенных факторов лесопожарного риска с целью корректировки класса природной пожарной опасности. На основе открытых пространственных данных и ГИС-технологий создан алгоритм детального картирования, интегрирующий различные антропогенные показатели. Подход позволяет количественно оценить риск возникновения пожаров и уточнить класс пожарной опасности

- для лесных участков с учетом антропогенной нагрузки, минимизируя финансовые затраты.
3. В результате исследования на территории Центральной лесостепи были идентифицированы буферные зоны влияния объектов антропогенной инфраструктуры (дорожно-тропиночной сети, рекреационных объектов и населенных пунктов) на лесные насаждения.
 4. Проведенный анализ пространственного распределения очагов возгораний выявил их выраженную приуроченность к элементам инфраструктуры. Установлено, что 50% всех пожаров возникают в 50-метровой зоне от дорог общего пользования. Данная зависимость носит кумулятивный характер: в пределах 120 м от дорог локализовано 77% возгораний, а 97% всех пожаров происходят не далее 230 м от транспортных путей.
 5. Анализ влияния населенных пунктов показал, что 18,2% пожаров возникают в непосредственной близости (до 250 м) от селитебных территорий. Накопленная частота возникновения пожаров демонстрирует устойчивый рост с увеличением расстояния, достигая 84,7% в радиусе 1750 м от границ населенных пунктов.
 6. Установлена статистически значимая сильная положительная корреляция между плотностью очагов возгораний и близость к объектам транспортной инфраструктуры ($r = 0,86$). Также выявлена умеренная зависимость частоты возникновения лесных пожаров от расстояния до селитебных зон и рекреационных объектов, что подтверждается коэффициентом детерминации $R^2 = 0,51$.
 7. Повышение детализации оценки антропогенных рисков является ключевым фактором для оперативного выделения зон с дифференцированным классом пожарной опасности и последующего принятия обоснованных управленческих решений. Практическое применение предлагаемого подхода позволит:
 - оптимизировать маршруты патрулирования с учетом конфигурации дорожно-тропиночной сети и локализации рекреационных объектов.
 - идентифицировать критические участки для установки предупреждающих аншлагов, обустройства противопожарных барьеров (канав) и организации средств ограничения доступа (шлагбаумов).

Список литературы

1. Labenski P., Ewald M., Schmidlein S., Ewald Fassnacht F. Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 29 April – 2022. – P.102799.- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102799>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57484910>.
2. Плотникова А.С. Шкала природной пожарной опасности лесных экосистем И.С. Мелехова. Обзор современных российских методических подходов // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т.4. – №2. – С. 1–13. - DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2 -URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46456855>.
3. Жаринов С.Н., Голубева Е.И., Зимин М.В. Концептуальные основы организации охраны лесов от пожаров // Вопросы лесной науки. – 2020. – № 3. – С. 1-8. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44304728> - DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-8.
4. Иванов С.А. Системный анализ факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров в Северо-Западном федеральном округе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 4. – С. 26–34. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49602614>. - DOI: 10.24143/2073-5529-2022-4-26-34.
5. Славский В.А., Матвеев С.М., Мироненко А.В., Литовченко Д.А. Совершенствование методологии дистанционного мониторинга пожарной опасности в лесах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2024. – № 3. – С. 113–131. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80257732>. - DOI: 10.21178/2079-6080.2024.3.113.

6. Котельников Р.В., Чугаев А.И. Сравнительная оценка качества индексов пожарной опасности в лесах // Сибирский лесной журнал. – 2023. – № 6. – С. 32-38. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59061148>. - DOI: 10.15372/SJFS20230604.
7. Белов А.Н. Лесные пожары как угроза пожарной безопасности: современное состояние и предупреждение // Вестник экономики, управления и права. – 2023. – Т. 16. – № 1. – С. 62-70. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54031823>.
8. ТАСС. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды. – URL: <https://tass.ru/info/6712527> (дата обращения 02.09.2024).
9. Balch J. K. et al. From the Cover: Human-started wildfires expand the fire niche across the United States // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2017. – Т. 114. – №. 11. – С. 29-46. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114>.
10. Turco M. et al. Anthropogenic climate change impacts exacerbate summer forest fires in California // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2023. – Т. 120. – №. 25. – С. e2213815120. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2213815120>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=61915205>.
11. Reis M., Mauricio P.L., Yanai A., Pacheco Ramos C.J. Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics // Journal of Environmental Management – 2021. – Vol. 288(1). P.112310. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=72975111>.
12. Dutta R., Das A., Aryal J. Big data integration shows Australian bush-fire frequency is increasing significantly // R. Soc. Open Sci – 2020. – Vol. 3. P. 150241 – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.150241>. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27073890>.
13. Штерензон В. А, Худякова С. А., Степанов О. И., Гренадеров А. Н. Факторы пожарной опасности регионов Российской Федерации // Техносферная безопасность. – 2020. – № 4(29). – С. 89-101. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44511453>.
14. Slavskiy V., Litovchenko D. Matveev S. Sheshnitsan S. Larionov M.V Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain // Land – 2023. – Vol. 12. P. 103. - DOI: 10.3390/land12010103.- URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50389254>.
15. Slavskiy V., Matveev S., Sheshnitsan S., Litovchenko D., Larionov M.V., Shokurov A., Litovchenko P., Durmanov N. Assessment of Phytomass and Carbon Stock in the Ecosystems of the Central ForestSteppe of the East European Plain: Integrated Approach of Terrestrial Environmental Monitoring and Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles // Life. – 2024. – Vol.14. P. 632. - DOI: 10.3390/life14050632. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67646001>
16. Славский В.А., Мироненко А.В., Матвеев С.М., Литовченко Д.А. Таксационно-дешифровочные показатели насаждений как основа разработки моделей машинного обучения для дистанционного мониторинга лесов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2022. – № 4. – С. 99-114. - DOI: 10.21178/2079-6080.2022.4.99. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50176282>
17. Shin J., Temesgen H., Strunk J.L., Hilker T. Comparing Modeling Methods for Predicting Forest Attributes Using LiDAR Metrics and Ground Measurements // Can. J. Remote Sens – 2016. – Vol. 42. P. 739–765. – DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1252908>.
18. Елисеев А.В., Васильева А.В. Природные пожары: данные наблюдений и моделирования // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2020. – Т.3. – С. 27-35. - DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-73-119. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44336347>.
19. Гизатуллин А.Т. Геоинформационное моделирование пожарной опасности природных территорий России / дисс. на сои. кан. геог. н. – Москва, 2023. – 182 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59955827>.

20. Abedi Gheshlaghi H., Feizizadeh B., Blaschke T. GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. *J // Environ. Plan. Manag* – 2020. – Vol. 63. P. 481–499. – DOI: <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726>.

21. Мироненко А.В., Матвеев С.М., Славский В.А., Водолажский А.Н., Литовченко Д.А. Алгоритм актуализации лесоустроительной информации и его апробация в Воронежской области // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства № 4. – 2022. – С. 85-98. DOI 10.21178/2079-6080.2022.4.85. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50176281>.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681551 Российская Федерация. Программа для систематизации наборов экспериментальных данных лесоводственно-таксационных признаков лесных насаждений: № 2022681518 : заявл. 15.11.2022 : опубл. 15.11.2022 / А. В. Мироненко, С. М. Матвеев, В. А. Славский; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова". – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49780865>.

References

1. Labenski P., Ewald M., Schmidtlein S., Ewald Fassnacht F. *Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning* // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 29 April – 2022. R.102799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102799>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57484910>.

2. Plotnikova A.S. *Shkala prirodnoy pozharney opasnosti lesnykh ekosistem* [Scale of natural fire danger of forest ecosystems I.S. Melekhova] I.S. Melekhova. *Obzor sovremennykh rossiyskikh metodicheskikh podkhodov Voprosy lesnoy nauki* = Review of modern Russian methodological approaches. Questions of forest science. 2021;(4): 1–13. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46456855>.

3. Zharinov S.N., Golubeva E.I., Zimin M.V. *Kontseptual'nye osnovy organizatsii okhrany lesov ot pozharov* [Conceptual foundations of forest fire protection organization]. *Voprosy lesnoy nauki*. Questions of forest science. 2020;(3): 1-8. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44304728>. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-8.

4. Ivanov S.A. *Sistemnyy analiz faktorov, vliyayushchikh na vozniknovenie lesnykh pozharov v Severo-Zapadnom federal'nom okruge* [A systematic analysis of the factors influencing the occurrence of forest fires in the North-Western Federal District]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science. 2022; 4: 26–34. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49602614>. DOI: 10.24143/2073-5529-2022-4-26-34.

5. Slavskiy V.A., Matveev S.M., Mironenko A.V., Litovchenko D.A. *Sovershenstvovanie metodologii distantsionnogo monitoringa pozharney opasnosti v lesakh* [Improving the methodology of remote monitoring of fire danger in forests]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* = Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry. (In Russ.). 2024;3: 113–131. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80257732>. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.3.113.

6. Kotelnikov R.V., Chugaev A.I. *Sravnitel'naya otsenka kachestva indeksov pozharney opasnosti v lesakh*. [Comparative assessment of the quality of fire hazard indices in forests] *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Forest Magazine. 2023;6: 32-38. (In Russ.). – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59061148>. DOI: 10.15372/SJFS20230604.

7. Belov A.N. *Lesnye pozhary kak ugroza pozharney bezopasnosti: sovremennoe sostoyanie i preduprezhdenie*. [Forest fires as a threat to fire safety: current status and prevention]. *Vestnik ekonomiki, upravleniya i prava* = Bulletin of Economics, Management and Law. 2023;(16): 62-70. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54031823>.

8. TASS. *Lesnye pozhary v Rossii. Statistika i antirekordy*. [Forest fires in Russia. Statistics and anti-records]. (In Russ.). URL: <https://tass.ru/info/6712527> (data obrashcheniya 12.03.2025).

9. Balch J. K. et al. From the Cover: *Human-started wildfires expand the fire niche across the United States*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2017;(114): 11: 29-46. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114>
10. Turco M. et al. *Anthropogenic climate change impacts exacerbate summer forest fires in California*. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2023;(120): 25. e2213815120. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2213815120>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=61915205>.
11. Reis M., Mauricio P.L., Yanai A., Pacheco Ramos C.J. *Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics*. Journal of Environmental Management. 2021; 288(1): 112310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=72975111>.
12. Dutta R., Das A., Aryal J. *Big data integration shows Australian bush-fire frequency is increasing significantly*. R. Soc. Open Sci. 2020;3: 150241. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.150241>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27073890>.
13. Shterenzon V. A., Khudyakova S. A., Stepanov O. I., Grenaderov A. N. *Faktyory pozharной opasnosti regionov Rossiyskoy Federatsii*. [Fire hazard factors in the regions of the Russian Federation]. Tekhnosfernaya bezopasnost = Technosphere safety. 2020;4(29): 89-101. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44511453>.
14. Slavskiy V., Litovchenko D. Matveev S. Sheshnitsan S. Larionov M.V *Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain*. Land. 2023;12: 103. DOI: 10.3390/land12010103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50389254>.
15. Slavskiy V., Matveev S., Sheshnitsan S., Litovchenko D., Larionov M.V., Shokurov A., Litovchenko P., Durmanov N. *Assessment of Phytomass and Carbon Stock in the Ecosystems of the Central ForestSteppe of the East European Plain: Integrated Approach of Terrestrial Environmental Monitoring and Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles*. Life. 2024;14: 632. DOI: 10.3390/life14050632. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67646001>.
16. Slavskiy V.A., Mironenko A.V., Matveev S.M., Litovchenko D.A. *Taksatsionno-deshifrovochnye pokazateli nasazhdeniy kak osnova razrabotki modeley mashinnogo obucheniya dlya distantsionnogo monitoringa lesov*. [Taxation and decoding indicators of plantings as a basis for the development of machine learning models for remote monitoring of forests]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva = Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry. 2022;4: 99-114. (In Russ.). DOI: 10.21178/2079-6080.2022.4.99. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50176282>.
17. Shin J., Temesgen H., Strunk J.L., Hilker T. *Comparing Modeling Methods for Predicting Forest Attributes Using LiDAR Metrics and Ground Measurements*. Can. J. Remote Sens. 2016; 42: 739–765. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1252908>.
18. Eliseev A.V., Vasil'eva A.V. *Prirodnye pozhary: dannye nablyudeniya i modelirovaniya*. [Natural fires: observational and modeling data]. Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology. 2020;(3): 27-35. (In Russ.). DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-73-119. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44336347>.
19. Gizatullin A.T. *Geoinformatsionnoe modelirovanie pozharной opasnosti prirodnikh territoriy Rossii*. [Geoinformation modeling of fire danger in natural areas of Russia]. diss. na soi. kan. geog. n = diss. on soi. kan. geog. n. – Moskva. 2023: 182. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59955827>.
20. Abedi Gheshlaghi H., Feizizadeh B., Blaschke T. *GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic*. J. Environ. Plan. Manag. 2020;63: 481–499. DOI: <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726>.
21. Mironenko A.V., Matveev S.M., Slavskiy V.A., Vodolazhskiy A.N., Litovchenko D.A. *Algoritm aktualizatsii lesoustroitel'noy informatsii i ego aprobatsiya v Voronezhskoy oblasti*. [The algorithm for updating forest management information and its testing in the Voronezh region]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva № 4 = Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry №4. 2022: 85-98. (In Russ.). DOI 10.21178/2079-6080.2022.4.85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50176281>.

22. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022681551 Rossiyskaya Federatsiya. *Programma dlya sistematizatsii naborov eksperimental'nykh dannykh lesovodstvenno-taksatsionnykh priznakov lesnykh nasazhdeniy: № 2022681518*. [A program for systematization of experimental data sets of forestry and taxation characteristics of forest plantations]. zayavl. 15.11.2022 : opubl. 15.11.2022. A. V. Mironenko, S. M. Matveev, V. A. Slavskiy; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet imeni G.F. Morozova" = applicant Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49780865>.

Сведения об авторах

✉ *Славский Василий Александрович* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6579-0344>; e-mail: slavskiyva@yandex.ru;

Водолажский Алексей Николаевич – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0847-3462>, e-mail: vod.a@list.ru;

Мироненко Алексей Викторович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: alexeymironenko66@gmail.com;

✉ *Майер Екатерина Ивановна* – аспирант 2 года обучения, преподаватель кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5984-4430>, e-mail: mayer99ks@yandex.ru.

Ларионов Максим Викторович – доктор биологических наук, профессор кафедры биоэкологии и биологической безопасности, Институт ветеринарной медицины, ветеринарно-санитарной экспертизы и агробезопасности, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» (Университет «РОСБИОТЕХ»), Волоколамское шоссе, д.1, Москва, Российская Федерация, 125080; e-mail: m.larionow2014@yandex.ru

Information about the authors

✉ *Vasiliy A. Slavskiy* – DSc (Agricultural Sciences), Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6579-0344>, e-mail: slavskiyva@yandex.ru;

Alexei N. Vodolazhskiy – Cand. Sci. (Agric.), Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0847-3462>, e-mail: vod.a@list.ru;

Aleksey V. Mironenko – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: alexeymironenko66@gmail.com;

✉ *Ekaterina I. Mayer* - 2-year postgraduate student, lecturer at the Department of Forestry, Metrology, Standardization and Certification, 8 Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5984-4430>, e-mail: mayer99ks@yandex.ru.

Maxim V. Larionov – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Bioecology and Biological Safety, Institute of Veterinary Medicine, Veterinary and Sanitary Expertise and Agricultural Safety, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH University), Volokolamskoe shosse, 11, Moscow, Russian Federation, 125080; e-mail: m.larionow2014@yandex.ru

✉ – Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/8>

УДК 630.6 531.5+630.161.32



Перспективы реализации лесоклиматических проектов в Российской Федерации в современных условиях

Леонид С. Ветров, leotax@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0005-2388-2960>

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер. д. 5, к. 1, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

В статье анализируются современное состояние государственной климатической политики в лесном секторе Российской Федерации, ключевые подходы к сокращению выбросов парниковых газов и накоплению углерода в лесных экосистемах, законодательно утвержденные положения о лесоклиматических проектах, механизме их реализации. По примерным оценкам ученых леса в России ежегодно поглощают около 600 млн т CO₂, то есть примерно треть от объёма всех выбросов парниковых газов в стране. В России общая площадь лесного фонда составляет около 1,2 млрд га, к управляемым лесам относится 78 % покрытых лесом земель лесного фонда, где одним из важнейших факторов внешнего воздействия на цикл углерода, помимо вмешательства в лесные экосистемы с целью получения лесных ресурсов, является проведение комплекса лесохозяйственных мероприятий. Ряд проведенных исследований показал, что запасы углерода и темпы его депонирования в лесных экосистемах зависят от состояния, породного состава, возрастной и товарной структуры лесов. Существенное влияние на данный аспект может оказать обоснованный выбор стратегии лесопользования, лесохозяйственной деятельности. Несмотря на то, что в лесной отрасли нашей страны и ранее уделялось внимание мероприятиям по сохранению экологического потенциала лесов, адаптации к изменениям климата и повышению устойчивости лесов система оценки эффективности их достижения требовала совершенствования. До 2024 года лесоклиматические инициативы не были урегулированы отраслевым законодательством, хотя вопрос назрел давно и особое значение приобрел после подписания в 2016 году Парижского соглашения, в целях осуществления Рамочной конвенции ООН по изменению климата. Вступившие в силу поправки в Лесной кодекс Российской Федерации в части лесоклиматических проектов, направлены на повышение возможностей поглощения парниковых газов лесных экосистем и приближения России к углеродной нейтральности к 2060 году.

Ключевые слова: изменение климата, лесохозяйственные мероприятия, лесной сектор экономики, лесные экосистемы, лесоклиматический проект, лесопользование, накопление углерода, парниковые газы

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: Ветров, Л. С. Перспективы реализации лесоклиматических проектов в Российской Федерации в современных условиях / Л. С. Ветров // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 121–132. – Библиогр.: с. 128–132 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/8>

Поступила 15.05.2025. Пересмотрена 02.09.2025. Принята 15.09.2025. Опубликовано онлайн 25.09.2025.

Prospects for the implementation of forest climate projects in the Russian Federation in modern conditions

Leonid S. Vetrov, leotax@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0005-2388-2960>

Saint Petersburg state forest technical University named after S.M. Kirov, Institutsky per., 5, k. 1, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation

Abstract

The article analyzes the current state of state climate policy in the forestry sector of the Russian Federation, key approaches to reducing greenhouse gas emissions and carbon accumulation in forest ecosystems, legislatively approved regulations on forest climate projects, and the mechanism for their implementation. According to rough estimates by scientists, forests in Russia annually absorb about 600 million tons of CO₂, that is, about a third of all greenhouse gas emissions in the country. In Russia, the total area of the forest fund is about 1.2 billion hectares, 78% of the forested lands of the forest fund belong to managed forests, where one of the most important factors of external influence on the carbon cycle, in addition to interference in forest ecosystems in order to obtain forest resources, is the implementation of a complex of forestry measures. A number of studies have shown that carbon reserves and the rate of its deposition in forest ecosystems depend on the condition, species composition, age and commodity structure of forests. A reasonable choice of strategy for forest management, forest management, and forestry activities can have a significant impact on this aspect. Despite the fact that the forestry industry in our country has previously paid attention to measures to preserve the ecological potential of forests, adapt to climate change and increase forest sustainability, the system for assessing the effectiveness of their achievement required improvement. Until 2024, forest-climate initiatives were not regulated by sectoral legislation, although the issue has been overdue for a long time and gained special importance after the signing of the Paris Agreement in 2016, in order to implement the UN Framework Convention on Climate Change. The amendments to the Forest Code of the Russian Federation that have entered into force regarding forest climate projects are aimed at increasing the possibilities of absorbing greenhouse gases from forest ecosystems and bringing Russia closer to carbon neutrality by 2060.

Keywords: *climate change, forestry measures, forest sector of the economy, forest ecosystems, forest climate project, forest management, carbon storage, greenhouse gases*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Vetrov L. S. (2025). Prospects for the implementation of forest climate projects in the Russian Federation in modern conditions. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 121-132 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/8>

Received 15.05.2025. Revised 02.09.2025. Accepted 15.09.2025. Published online 25.09.2025.

Введение

Площадь покрытых лесной растительностью земель в России составляет 795 млн га (46,4 %), на долю земель лесного фонда приходится 96,4 % покрытых лесом площадей (766,6 млн га), 2 % земли

особо охраняемых природных территорий (ООПТ) [1].

Лесные насаждения выполняют климаторегулирующие, средозащитные, почвозащитные, водоохранные, санитарно-оздоровительные функции, а

также играют существенную роль в поглощении углекислого газа из атмосферы.

Выбор и обоснование стратегий лесопользования и ведения лесного хозяйства являются одной из важнейших современных задач, стоящих перед лесным комплексом, при этом вариант максимально эффективный путь развития лесного хозяйства и лесной промышленности страны логично рассматривать, в том числе, с точки зрения выполнения лесами экологических, климатических, сырьевых и иных функций [2].

В последнее время возросла значимость лесоклиматических инициатив, направленных на редуцирование эмиссии парниковых выбросов и повышение абсорбции углерода лесами, с целью достижения углеродной нейтральности к 2060 году, то есть объемы выбросов должны сравняться с объемами поглощения парниковых газов [3, 4, 5, 6].

В своём докладе «Экономические эффекты климатических изменений в России» исследователи Института народнохозяйственного прогнозирования РАН (ИНП РАН) отмечают, что объёмы ущерба от потепления на 1 градус во всех отраслях составили 2,45 трлн руб., а выгоды – 3,64 трлн руб. [7].

Являясь основным структурным элементом органического вещества, углерод преобладает в расчете на сухую массу, например, в сухой биомассе растений содержится от 45 до 53 % углерода. В ходе лабораторных исследований и анализа установлено, что наибольшей аккумулирующей способностью обладают дуб, лиственница, сосна и ель.

Одним из важнейших факторов внешнего воздействия на цикл углерода в управляемых лесных территориях, помимо вмешательства в лесные экосистемы с целью получения лесных ресурсов, является проведение комплекса лесохозяйственных мероприятий. Организация, планирование, объем, интенсивность, сроки проведения лесохозяйственных мероприятий для различных условий представляют собой ключевой шаг в ходе к адаптации и снижению негативного воздействия от изменения климата [8, 9].

В настоящее время отдельное внимание уделяется лесоклиматическим проектам, направленных

на повышение качества менеджмента лесов и снижение уязвимость природных территорий к негативному воздействию, вызываемых переменами климата.

Предполагается, что совершенствование лесохозяйственной деятельности, как наиболее перспективная стратегия, должно предусматривать обеспечение выращивания лесных насаждений с максимально возможным запасом древесины на единицу продуцирующей площади. Это позволит не только добиться решения социально-экономических задач, но и повысить поглощение парниковых газов.

Материалы и методы

Объектами исследований являются лесоклиматические проекты, соответствующие поправки о которых теперь включены в отраслевое законодательство Российской Федерации. Рассматриваются вопросы совершенствования подходов к устойчивому управлению лесами и перспективы увеличения накопления углерода в лесных экосистемах.

Используемые в работе методы – контент-анализ нормативной и методологической базы; изучение, обобщение и теоретическое осмысление имеющегося опыта в части направления научных изысканий.

Исследовательская база включает информационные (правовые и литературные) источники, включая базы данных Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области изменения климата; статистические и иные отраслевые материалы, содержащие актуальную информацию о характеристиках, состоянии и динамике лесного фонда, лесопользовании, охране, защите, воспроизводству лесов.

Результаты и обсуждение

Региональный баланс углерода лесов в значительной степени определяется характером и интенсивностью лесохозяйственной деятельности. Среди всех лесохозяйственных мероприятий, влияющих на баланс углерода в управляемых лесах, условно можно выделить 3 группы:

- снижающие запас углерода (ежегодные рубки лесных насаждений для лесозаготовки, создание линейных и промышленных объектов, населенных пунктов и др.).

- нейтральные (естественное возобновление лесов, сохранение коренных лесов и ключевых биотопов, выделение особо охраняемых природных территорий леса).

- повышающие запас углерода (лесозащитные и противопожарные мероприятия; лесовосстановление и лесоразведение с предпочтением пород, наиболее устойчивых к изменениям климата для конкретных лесорастительных условий); рекультивация нарушенных земель).

19 февраля 2024 года на заседании комиссии Правительства по законопроектной деятельности был одобрен документ, разработка которого направлена на закрепление лесоклиматических инициатив на законодательном уровне. В декабре 2024 года соответствующие поправки были приняты и подписаны Президентом нашей страны В.В. Путиным. Соответствующий Федеральный закон от 26 декабря 2024 года № 492-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации» вступил в действие с 1 января 2025 года [10].

В новой редакции Лесного кодекса Российской Федерации официально закреплено понятие «лесоклиматический проект» в качестве добровольного действия по сохранению лесов с целью увеличения поглощения парниковых газов, что, в свою очередь, способствует повышению конкурентоспособности лесной отрасли на международном уровне, где требования к экологизации производств достаточно высоки.

Предусматриваемые лесоклиматическими проектами мероприятия направлены на сокращение

выбросов парниковых газов путем сохранения лесных экосистем, восстановление утраченных и создания новых лесных насаждений.

Главой 4.1. Лесного кодекса Российской Федерации регламентируются положения, касающиеся климаторегулирующих возможностей лесов.

Часть 1 статьи 19 Лесного кодекса Российской Федерации о мероприятиях по сохранению лесов дополнена пунктом, относящимся к юридическим и физическим лицам инициаторам лесоклиматических проектов.

Частью 2 статьи 66.1. «Общие положения о климаторегулирующем потенциале лесов» определяются задачи исполнения лесоклиматических проектов для сохранения климаторегулирующего потенциала лесов. Особо выделена реализация мероприятий по сохранению лесов.

Лесоклиматические проекты планируются к внедрению в соответствии с Лесным кодексом Российской Федерации и Федеральным законом от 2 июля 2021 года № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [11]. Последний регулирует круг вопросов, касающихся ограничения выбросов парниковых газов в нашей стране; определяет основные понятия климатической направленности; устанавливает принципы и порядок учета выбросов CO₂ и поглощений, включая реестры выбросов и банк углеродных единиц. Подобный подход позволяет осуществлять объективный и всесторонний мониторинг климатических проектов, способствует достоверности оценки выполнения климатических обязательств и основанного получения углеродных единиц.

Согласно части 1 статьи 66.2 лесоклиматический проект представляет собой климатический проект, реализуемый в лесах, расположенных на землях лесного фонда и землях иных категорий, за исключением земель сельскохозяйственного назначения. Проекты осуществляются на добровольных началах в части мероприятий по сохранению лесов, направленных на снижение выбросов и увеличение абсорбции парниковых газов, сверх того, что выполняется лицами, которые используют леса или на которых в соответствии с Лесным Кодексом возложена обязанность по исполнению этих мероприятий. Только в

этом случае может фиксироваться дополнительность проекта

Статья 66.3 предусматривает реализацию климатических проектов на основании Соглашения между Федеральным органом исполнительной власти и заинтересованными лицами. В Соглашении даётся информация о местоположении, границах, площади территории, на которой предусмотрены лесохозяйственные мероприятия лесоклиматического проекта, данные о видах, объемах, сроках проведения работ и др.

Приложением к указанному Соглашению является «графическое описание границ территории, в пределах которой планируется реализация лесоклиматического проекта, перечень координат характерных точек этих границ в системе координат, используемой для ведения Единого государственного реестра недвижимости».

Пунктом 7 части 3 статьи 66.3 отмечено, что в обязательства юридического или физического лица входит включение в реестр углеродных единиц в течение пяти лет со дня заключения Соглашения сведения о лесоклиматическом проекте.

Важно отметить, что частью 6 статьи 66.3 предусмотрено, что лесоклиматический проект может быть реализован также на лесных (земельных) участках, предоставленных в аренду для осуществления видов лесопользования в соответствии с статьёй 25 Лесного кодекса Российской Федерации. В этом случае реализация проекта после добровольного письменного согласия правообладателей (арендаторов) данных участков.

Исполнитель проекта вправе за счет собственных средств привлекать к его реализации другие заинтересованные организации, в частности, государственные и муниципальные учреждения.

Причины для отказа в заключении Соглашения на осуществление лесоклиматического проекта представлены в части 10 статьи 66.3. Лесного кодекса Российской Федерации. Одним из ключевых аргументов для отказа является несоответствие планируемых при реализации лесоклиматического проекта мероприятий требованиям отраслевых норм.

Статья 66.4. Лесного кодекса Российской Федерации предусматривает оценку результатов лесоклиматического проекта на основе изменений качественных, количественных и иных характеристик лесов и лесных ресурсов, произошедших в результате осуществления мероприятий, предусмотренных Соглашением о реализации лесоклиматического проекта. При этом полученные данные вносятся в дорожные карты регионов и районных лесничеств и государственный лесной реестр (ГЛР).

Лесоклиматические проекты в настоящее время регулируются как международными актами, такими как Парижское соглашение, а также российскими законами: Лесным кодексом Российской Федерации и Федеральным законом «Об ограничении выбросов парниковых газов».

Согласно положениям решения 26-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата в 2021 году, срок реализации лесоклиматического проекта может достигать 15 лет с возможностью продления до двух раз. В рамках реализации положений этой конференции в Российской Федерации в последние годы приняты ряд методологий по обоснованию разработке и внедрению лесоклиматических проектов [12, 13, 14].

Результаты лесоклиматических проектов оцениваются в углеродных единицах – верифицированном показателе реализации климатического проекта, выражаемом в массе парниковых газов, эквивалентной одной 1 т CO₂. Российский реестр углеродных единиц (УЕ) начал работать с 1 сентября 2022 года, в нем содержится информация о реализуемых в России климатических проектах и выпущенных ими углеродных единицах [15]. На начала мая 2025 года в нём числится 64 климатических проектов, и только один – лесоклиматический: в Красноярском крае реализуемый АО «РУСАЛ Красноярск».

Об участии в лесоклиматических проектах приняли решение такие крупные компании, как «Роснефть», «Уралхим», «Сибур». По данным Всемирного банка с 2022 года в мире утверждено и реализуется более 250 лесоклиматических проектов.

В России создается система добровольных климатических проектов и обращения углеродных

единиц. По данным РБК приводится такая информация: средняя стоимость углеродной единицы по сделкам 2023 года составила 850 руб., а всего к концу 2023 года выпущено более 87,5 тыс. УЕ.

Согласно материалам ФГБУ «Рослесинфорг», леса в России способны поглощать до 530 млн т CO₂, однако их поглощающая способность может быть переоценена более чем на треть в сторону повышения. Для поглощения 1 т CO₂ требуется 2,5 га леса.

Стратегией социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года определены меры по обеспечению к 2030 году сокращения выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 года. С учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем до 2050 года поставлена задача сократить выбросы на 50% [16].

Предполагается, что нетто-поглощение CO₂ лесными экосистемами вырастет с 646,4 млн т в 2023 году до 788,7 млн т к 2030 году. Площадь лесных территорий, на которых осуществляются мероприятия по лесовосстановлению и лесоразведению, увеличится с 1506 тыс. до 7000 тыс. га.

В рамках приоритетного интенсивного сценария развития лесного комплекса предполагается обеспечение роста поглощающей способности управляемых экосистем с текущих 535 млн т CO₂ до 1,2 млрд т в лесном хозяйстве. К 2060 году Россия должна стать углеродно-нейтральной страной, то есть выбросы должны быть компенсированы поглощением парниковых газов.

По данным Национального кадастра антропогенных выбросов в 2021 году совокупные антропогенные эмиссии в России составили 2156,6 млн т CO₂-эквивалента без учета поглощающей функции сектора землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) и 1671,8 млн т CO₂-эквивалента с учетом ЗИЗЛХ.

Здесь необходимо обратить внимание на следующий аспект. Согласно установленным требованиям для учета результатов лесоклиматического проекта и внесения в реестр углеродных единиц необходимы соответствующие методики для каждого из видов проводимых мероприятий. При этом в

настоящее время ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля» разработаны методологии для лесоклиматических проектов по лесовосстановлению; улучшенному управлению лесным хозяйством, в том числе охране лесов от пожаров и снижению воздействия лесозаготовок [13, 14]. Основным недостатком имеющихся методик является то, что они дают только рамочные рекомендации при отсутствии четкого и понятного алгоритма обоснования и реализации и оценки результатов проекта.

Перечень планируемых лесохозяйственных мероприятий гораздо шире и включает необходимость разработки и утверждения аналогичных методологий по лесоразведению, плантационному выращиванию древесных пород, защите лесов от фито- и энтомовредителей, агротехническим и лесоводственным уходам за лесами. При этом необходимо руководствоваться критериями действующих отраслевых нормативно-правовых актов, документов лесного планирования и проектирования с учетом экономического, экологического и социального факторов.

Системы прозрачности контроля и учета полученных результатов важны для оценки реального вклада лесоклиматических проектов в снижение выбросов парниковых газов и, в перспективе, агрегации с международными платформами. Помимо результативности мер каждого из лесоклиматических проектов, необходимо оценивать их совокупное влияние на углерододепонирующую способность растительности в пределах лесного участка, лесничества, субъекта Российской Федерации, страны в целом. Так, если на территории определенного лесного участка будут осуществляться мероприятия, максимально способствующие охране, защите, воспроизводству лесов, повышению их продуктивности, а на окружающих вести активная вырубка леса, возникать очаги природных пожаров, вредителей и болезней, то общий положительный эффект лесоклиматического проекта на региональном уровне будет нивелирован, а поставленные цели не достигнуты. Поэтому необходим всесторонний экологичный подход не только в области лесного хозяйства, но всех секторов экономики в целом.

Сложности с подсчётами и оценкой углеродных показателей появились с момента внесения в типовую форму лесных планов субъектов Российской Федерации требований отчетности, согласно приложению 21 [17]. Задачи ставились в части осуществления планируемых мероприятий по сохранению экологического потенциала лесов, адаптации к изменениям климата и повышению устойчивости лесов в связи с отсутствием понятной методики определения.

В основном применялась методика, согласно рекомендациям МГЭИК, при этом основными составляющими углеродного регулирования лесов являются нетто-поглощение, потери, и бюджет углерода. Расчет углерода надземной фитомассы древостоя осуществляется через приводимые в материалах государственного лесного реестра (ГЛР) объемные запасы древесины насаждений и конверсионные коэффициенты, представляющие собой отношения запаса углерода надземной фитомассы к запасу стволовой древесины. Но следует отметить, что по экспертным оценкам вклад лесов России в аккумуляцию CO_2 недооценен и нуждается в детальном изучении и более точных расчетах.

«Монетизация» CO_2 по результатам лесоклиматических проектов возможна при условии их сертификации по международным стандартам. В 2022 году был введен ГОСТ Р ИСО 14080-2021 «Национальный стандарт Российской Федерации. Управление парниковыми газами и связанные виды деятельности. Система подходов и методическое обеспечение реализации климатических проектов». Но практика исследований в области изменений климата показывает, что России нужны расширенные лесоклиматические стандарты с учетом лесного районирования, продуктивности лесных насаждений, сценария развития регионов, степени нарушенности осваиваемых территорий, перспектив их дальнейшего использования с учетом экологического, экономического и социального факторов.

В целях повышения эффективности реализации лесоклиматических проектов необходима подготовка конкретных программ федерального и регионального уровня по переходу на устойчивое интенсивное лесопользование и воспроизводство лесов

[2]. Современные и понятные методики расчетов депонирования CO_2 , должны быть интегрированы в документы лесного планирования и проектирования, а в будущем – в Федеральную государственную систему лесного комплекса (ФГИС ЛК). Соответствующие меры позволят иметь актуальную цифровую базу данных углеродного баланса в лесном фонде.

По мнению ученых ФГБУ «Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» необходимо использовать методы математического моделирования при планировании лесоклиматических проектов, расчеты перспектив получения углеродных единиц за счет оптимального выбора породного состава, видов и объемов работ на конкретных территориях [18, 19].

Наиболее сложным в плане реализации, валидации и степени рисков является лесоклиматический проект, связанный с охраной лесов от пожаров [20].

Заключение

Региональный баланс углерода лесов в значительной степени лимитируется характером и интенсивностью лесохозяйственной деятельности. Решение о внедрении в практику лесохозяйственных мероприятий климатической направленности позволит оптимизировать подходы к сохранению лесных экосистем, как основных поглотителей углерода.

До настоящего времени практика планирования, реализации и контроля мер по адаптации лесного сектора экономики к климатическим изменениям, сохранения лесов и увеличению накопления углерода в лесах свидетельствовала об их недостаточной эффективности.

Внесенные в Лесной кодекс Российской Федерации поправки в виде Главы 4.1. «Климаторегулирующий потенциал лесов» позволили законодательно урегулировать инициативы по включению лесного комплекса в процесс декарбонизации, в том числе, в формате лесоклиматических проектов.

Лесоклиматические проекты направлены на сокращение выбросов парниковых газов и накопле-

ние углерода в лесных экосистемах со сроком реализации 10-15 лет и более (с целью обеспечения учета результативности). Принятая в 2021 году Стратегия низкоуглеродного развития нашей страны видит своей целью обеспечение поглощения выбросов лесами, чтобы стать углеродно-нейтральной к 2060 году Россия должна компенсировать 1,1 млрд т выбросов CO₂.

Вступившие в силу поправки в Лесной кодекс Российской Федерации будут способствовать модернизации лесного хозяйства в области климатических мероприятий; вовлечению участников лесных отношений в процессы сокращения выбросов парниковых газов и накопления углерода в лесных экосистемах.

Законодательно урегулированы вопросы предоставления территорий для реализации лесоклиматических проектов, права и обязанности сторон в лице органов государственной власти и организаций-инициаторов данного вида деятельности, действующих на добровольной основе. Подобный подход позволяет вовлечь в проект третьи заинтересованные стороны, осуществлять мероприятия климатической направленности на лесных участках, переданных для иных видов использования. Отсутствие сегодня типового Соглашения по реализации лесоклиматических проектов до конца не позволяет разделить права, обязанности и ответственность сторон.

Несмотря на важные шаги государства в сторону мер сокращения выбросов парниковых газов и высокий потенциал ряда проектов и инициатив по накоплению углерода, существует еще ряд проблем, требующих научного подхода и обсуждения в целях

совершенствования процессов реализации и оценки результатов лесоклиматических проектов.

При подборе территорий для осуществления лесоклиматических проектов необходимо наличие актуальной информации о планируемых к освоению лесных (земельных) участках; вовлечение максимально большого количества участников в лесоклиматическую деятельность, переход на интенсивный сценарий использования и воспроизводства лесов.

Важно обеспечить эффективность оценки нетто-поглощения CO₂ неуправляемыми лесами; унифицировать методы оценки пулов углерода и потоков парниковых газов в экосистемах на основе интеграции данных наземных измерений, дистанционного зондирования и математического моделирования с разработкой единой информационно-аналитической системы на федеральном и региональном уровнях.

Повышение качества лесопользования на всех уровнях, мониторинг состояния вовлеченных в лесоклиматические проекты экосистем, ведение устойчивого неистощительного лесопользования, эффективное выполнение мероприятий по охране и защите лесов и воспроизводству лесов позволят управлять региональным балансом углерода и смягчить отрицательное воздействие изменений климата. Следует шире применять современные технологии, включая генетические исследования, с целью подбора видового состава лесных насаждений, способного максимально приспосабливаться к изменению климата. Необходимо принимать во внимание не только принципы сохранения лесов, увеличения лесистости территорий, но и требуется изучения углеродозапасающей способности древесных растений, и других компонентов лесных экосистем.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году»: [официальный сайт] / Министерство природных ресурсов и экологии РФ. – URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2023_/ (дата обращения: 30.01.2025). – Текст: электронный.
2. Концепция интенсивного использования и воспроизводства лесов / ФБУ «СПбНИИЛХ». – Санкт-Петербург: СПбНИИЛХ, 2015. – 16 с.
3. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг.: в 2 ч. / Росгидромет. – Москва,

2022. – Ч. 1. – 468 с. – URL: http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf (дата обращения: 12.03.2025). – Текст : электронный.

4. Об ограничении выбросов парниковых газов: Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ: (ред. от 26.12.2024) // КонсультантПлюс: справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/ (дата обращения: 30.01.2025). – Текст: электронный.

5. О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 № 3052-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtlpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 03.11.2024). – Текст электронный.

6. Птичников, А. В. Современная климатическая повестка: какие изменения актуальны в лесном хозяйстве России? / А. В. Птичников, Е. А. Шварц // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – Вып. 242. – С. 129–142. – URL: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.242.129-142>. – Текст: электронный.

7. Экономические эффекты климатических изменений в России / ЦКПЭР. – Москва, 2024. – 15 с. – URL: <https://ecfor.ru/wp-content/uploads/2024/09/ekonomicheskie-effekty-klimaticheskikh-izmenenij-v-rossii.pdf> (дата обращения: 05.02.2025). – Текст: электронный.

8. Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе снижение воздействия лесозаготовок. Методология реализации климатического проекта № 0012. Версия 2.0 / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. – 2023. – 34 с. // Реестр углеродных единиц: [официальный сайт]. – URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960012_rus.pdf (дата обращения: 15.01.2025). – Текст: электронный.

9. Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 марта 2023 г. № 559-р // Информационно-правовой портал ГАРАНТ.РУ. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73266443/> (дата обращения: 14.03.2023). – Текст: электронный.

10. О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 26.12.2024 № 492-ФЗ // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: справочная система / АО «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1310670022> (дата обращения: 14.02.2025). – Текст: электронный.

11. Об ограничении выбросов парниковых газов: Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ: (ред. от 26.12.2024) // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : справочная система / АО «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/607142402> (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

12. Обоснование дополнительности проектной деятельности. Руководство № 001 / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. – 2023. – 13 с. // Реестр углеродных единиц: [официальный сайт]. – URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960010_rus.pdf (дата обращения: 03.02.2025). – Текст: электронный.

13. Лесовосстановление. Методология реализации климатического проекта № 0010. Версия 2.0 / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. – 2023. – 35 с. // Реестр углеродных единиц: [официальный сайт]. – URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960010_rus.pdf (дата обращения: 03.02.2025). – Текст: электронный.

14. Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров. Методология реализации климатического проекта № 0011. Версия 2.0 / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. – 2023. – 34 с. // Реестр углеродных единиц: [официальный сайт]. – URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960011_rus.pdf (дата обращения: 03.02.2025). – Текст: электронный.

15. Реестр углеродных единиц: [официальный сайт]. – URL: <https://carbonreg.ru/> (дата обращения: 21.02.2025). – Текст: электронный.

16. О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 № 3052-р

// Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: справочная система / АО «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341> (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

17. Об утверждении типовой формы и состава лесного плана субъекта Российской Федерации, порядка его подготовки и внесения в него изменений: приказ Минприроды России от 20.12.2017 № 692 // Консультант-Плюс : справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_295497/ (дата обращения: 15.02.2025). – Текст: электронный.

18. Коротков, В. Н. Лесоклиматические проекты, их углеродный потенциал, преимущества и недостатки / В. Н. Коротков. – URL: <https://climate-change.moscow/article/lesoklimaticheskie-proekty-ih-uglerodnyy-potencial-preimushchestva-i-nedostatki?ysclid=ld1x6hxplc284977585> (дата обращения: 09.01.2025). – Текст: электронный.

19. Коротков, В. Н. Лесные климатические проекты в России: ограничения и возможности / В. Н. Коротков // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2022. – Т. 7, № 4. – URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-4-3>. – Текст: электронный.

20. Алексеев, А. С. Борьба с лесными пожарами как климатический проект в области лесных отношений (на примере Красноярского края) / А. С. Алексеев, Л. С. Ветров, А. А. Никифоров // Леса России: политика, промышленность, наука, образование материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, 24–26 мая 2023 г. – Санкт-Петербург : ИПО СПбГЛТУ, 2023. – С. 115–111.

References

1. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. (2023). *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu»* [State report «On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2023»]. Retrieved January 30, 2025, from https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2023_/ (in Russ.).

2. Saint-Petersburg Forestry Research Institute (SPbNIIЛKH). (2015). *Kontseptsiya intensivnogo ispol'zovaniya i vosпроизводства лесов* [The concept of intensive use and reproduction of forests]. SPbNIIЛKH. (in Russian).

3. Roshydromet. (2022). *Natsional'nyy doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Montreal'skim protokolom za 1990–2020 gg.* [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and absorption by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020] (Ch. 1). Retrieved March 12, 2025, from http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf (in Russ.).

4. Federal'nyy zakon ot 02.07.2021 № 296-FZ «Ob ogranichenii vybrosov parnikovyykh gazov» [Federal Law No. 296-FZ of July 2, 2021 «On limiting greenhouse gas emissions»]. (2021). ConsultantPlus. Retrieved January 30, 2025, from https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/ (in Russ.).

5. Government of the Russian Federation. (2021, October 29). Rasporiazhenie № 3052-r «O Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyykh gazov do 2050 goda» [Order No. 3052-r «On the Strategy for the socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050»]. Retrieved November 3, 2024, from <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (in Russ.).

6. Ptichnikov, A. V., & Schwartz, E. A. (2023). Sovremennaya klimaticheskaya povestka: kakie izmeneniya aktual'ny v lesnom khozyaystve Rossii? [The modern climate agenda: what changes are relevant in Russian forestry?]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 242, 129–142. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.242.129-142> (in Russ.).

7. Center for Environmental and Natural Resource Economics (CENRE). (2024). *Ekonomicheskie efekty klimaticheskikh izmeneniy v Rossii* [Economic effects of climate change in Russia]. Retrieved February 5, 2025, from <https://ecfor.ru/wp-content/uploads/2024/09/ekonomicheskie-effekty-klimaticheskih-izmeneniy-v-rossii.pdf> (in Russ.).

8. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. (2023). *Uluchshennoye upravleniye lesnym khozyaystvom, v tom chisle snizheniye vozdeystviya lesozagotovok. Metodologiya realizatsii klimaticheskogo proyekta № 0012. Versiya 2.0* [Improved forest management, including reduced impact of logging. Methodology for the implementation of climate project No. 0012. Version 2.0]. Registry of Carbon Units. Retrieved January 15, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960012_rus.pdf (in Russ.).
9. Natsional'nyy plan meropriyatiy vtorogo etapa adaptatsii k izmeneniyam klimata na period do 2025 goda: utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 11 marta 2023 g. № 559-r [National action plan for the second stage of adaptation to climate change for the period up to 2025: approved by the order of the Government of the Russian Federation of March 11, 2023 No. 559-r]. (2023). Garant.ru. Retrieved March 14, 2023, from <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73266443/> (in Russ.).
10. Federal'nyy zakon ot 26.12.2024 № 492-FZ «O vnesenii izmeneniy v Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii» [Federal Law No. 492-FZ of December 26, 2024 «On Amendments to the Forest Code of the Russian Federation»]. (2024). KonsultantPlyus. Retrieved February 14, 2025, from <https://docs.cntd.ru/document/1310670022> (in Russ.).
11. Federal'nyy zakon ot 02.07.2021 № 296-FZ «Ob ogranichenii vybrosov parnikovyykh gazov» [Federal Law No. 296-FZ of July 2, 2021 «On limiting greenhouse gas emissions»]. (2021). KonsultantPlyus. Retrieved February 12, 2025, from <https://docs.cntd.ru/document/607142402> (in Russ.).
12. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. (2023). *Obosnovaniye dopolnitel'nosti proyektnoy deyatel'nosti. Rukovodstvo № 001* [Justification of project activity additionality. Guidance No. 001]. Registry of Carbon Units. Retrieved February 3, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960010_rus.pdf (in Russ.).
13. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. (2023). *Lesovosstanovleniye. Metodologiya realizatsii klimaticheskogo proyekta № 0010. Versiya 2.0* [Reforestation. Methodology for the implementation of climate project No. 0010. Version 2.0]. Registry of Carbon Units. Retrieved February 3, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960010_rus.pdf (in Russ.).
14. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. (2023). *Uluchshennoye upravleniye lesnym khozyaystvom, v tom chisle okhrana lesov ot pozharov. Metodologiya realizatsii klimaticheskogo proyekta № 0011. Versiya 2.0* [Improved forest management, including forest fire protection. Methodology for the implementation of climate project No. 0011. Version 2.0]. Registry of Carbon Units. Retrieved February 3, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960011_rus.pdf (in Russ.).
15. *Registry uglerodnykh yedinit* [Registry of carbon units]. (n.d.). Retrieved February 21, 2025, from <https://carbonreg.ru/ru/> (in Russ.).
16. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 29.10.2021 № 3052-r «O Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyykh gazov do 2050 goda» [Order of the Government of the Russian Federation of October 29, 2021 No. 3052-r «On the Strategy for the socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050»]. (2021). KonsultantPlyus. Retrieved February 12, 2025, from <https://docs.cntd.ru/document/726639341> (in Russ.).
17. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. (2017, December 20). *Prikaz № 692 «Ob utverzhdenii tipovoy formy i sostava lesnogo plana sub"yekta Rossiyskoy Federatsii, poryadka ego podgotovki i vneseniya v nego izmeneniy»* [Order No. 692 «On approval of the standard form and content of the forest plan of a constituent entity of the Russian Federation, the procedure for its preparation and amendment»]. ConsultantPlus. Retrieved February 15, 2025, from https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_295497/ (in Russ.).
18. Korotkov, V. N. (n.d.). *Lesoklimaticheskiye projekty, ikh uglerodnyy potentsial, preimushchestva i nedostatki* [Forest climate projects, their carbon potential, advantages and disadvantages]. Retrieved January 9, 2025, from <https://climate-change.moscow/article/lesoklimaticheskie-proekty-ih-uglerodnyy-potencial-preimushchestva-i-nedostatki?ysclid=ld1x6hxplc284977585> (in Russian).

19. Korotkov, V. N. (2022). Lesnyye klimaticheskiye proyekty v Rossii: ogranicheniya i vozmozhnosti [Forest climate projects in Russia: limitations and opportunities]. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 7 (4). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-4-3> (in Russian).

20. Alekseev, A. S., Vetrov, L. S., & Nikiforov, A. A. (2023). Bor'ba s lesnymi pozharemi kak klimaticheskiy proyekt v oblasti lesnykh otnosheniy (na primere Krasnoyarskogo kraya) [Forest fire fighting as a climate project in the field of forest relations (on the example of Krasnoyarsk Territory)]. In *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovaniye. Materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forests of Russia: politics, industry, science, education. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference] (pp. 115–117). IPO SPbSLTU. (in Russ.).

Сведения об авторах

Ветров Леонид Степанович – канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер. д. 5, к. 1, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2388-2960>, e-mail: leotax@mail.ru

Information about the authors

Leonid S. Vetrov – Cand. Sci (Agric), Associate Professor of the department of forest inventory, management and GIS, St. Petersburg State Forest Technical University, Institutsky per., 5, k. 1, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2388-2960>, e-mail: leotax@mail.ru

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/9>

УДК 630* + 336.226.64 + 504.064.36 + 339.564



Углеродный налог на экспорт лесоматериалов и пиломатериалов как мера национальной промышленной и климатической политики

Роман В. Гордеев¹✉, rumgord@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>

Антон И. Пыжев¹, pyanist@ya.ru <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>

¹Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Академика Лаврентьева 17, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация

Леса России играют ключевую роль в регулировании глобальной климатической системы, однако экономический потенциал этого природоресурсного актива еще не раскрыт. В работе предложен механизм установления углеродного налога на экспорт лесоматериалов и пиломатериалов, который преследует одновременно цели создания источника финансирования климатических инициатив и создания стимулов глубокой переработки древесины отечественной лесной промышленностью. Разработан подход к оценке углеродного баланса регионов России на основе статистики внешней торговли продукцией из древесины за 2016—2021 гг. и данных о транспортировке этой продукции. Полученные результаты свидетельствуют о ведущей роли регионов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Запада России в экспорте малообработанной древесины. При цене углеродной единицы на уровне в 1000 руб. за 1 тонну CO₂, и объемах внешней торговли древесиной на уровне 2021 г. мы оцениваем потенциальные платежи за общие выбросы от экспорта необработанных лесоматериалов и пиломатериалов в сумму, эквивалентную 65,7 млрд руб. Треть этого объема приходится на Иркутскую область, Красноярский и Хабаровский края. Вырученные средства могли бы быть использованы в целях создания фонда финансирования лесоклиматических проектов в России. Предложенная мера государственного регулирования внешней торговли продукцией из древесины может рассматриваться как альтернатива существующим таможенным пошлинам на вывоз круглого леса, поскольку она соответствует политике в области стимулирования производств с высокой добавленной стоимостью и, кроме того, способствует достижению национальных климатических целей.

Ключевые слова: лесная промышленность, лесоклиматические проекты, углеродный баланс, углеродный налог, платежи за выбросы, Азиатская Россия, пиломатериалы


Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания по плану НИР ИЭОПП СО РАН, проект 5.6.3.2. (0260-2021-0005) «Движущие силы и механизмы развития кооперационных и интеграционных процессов в экономике Сибири», № 121040100279-5.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гордеев, Р. В. Углеродный налог на экспорт лесоматериалов и пиломатериалов как мера национальной промышленной и климатической политики / Р. В. Гордеев, А. И. Пыжев // Лесотехнический журнал. — 2025. — Т. 15. — № 3 (59). — С. 133–147. — Библиогр.: с. 141–146 (53 назв.). — DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/9>

Поступила 01.04.2025. Пересмотрена 03.09. 2025. Принята 15.09. 2025. Опубликована онлайн 25.09.2025.

Carbon tax on roundwood and sawn wood exports as a measure of national industrial and climate policy

Roman V. Gordeev¹✉, rumgord@ya.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>

Anton I. Pyzhev¹, pyanist@ya.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>

¹*Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 17 Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk 630090, Russian Federation*

Abstract

Russia's forests play a crucial role in regulating the global climate system, but the economic potential of this natural resource has yet to be explored. We propose a mechanism for regulating foreign trade by implementing a carbon tax on the export of roundwood and sawn wood that would serve both the goals of creating a funding source for climate mitigation initiatives in forestry and incentivizing deep wood processing. Our approach utilizes statistics on foreign trade in wood products from 2016 to 2021, along with data on the transportation of these commodities, to assess the carbon balance of Russian regions. The findings indicate that the regions of Siberia, the Far East, and North-West of Russia play a predominant role in the export of low-processed wood. Applying a carbon unit price of 1,000 rubles per ton of CO₂ and trade volumes at the 2021 level, we estimate potential payments for total emissions from the export of roundwood and sawn wood at 65.7 billion rubles. The Irkutsk Oblast, Krasnoyarsk Krai and Khabarovsk Krai account for one third of this volume. The collected duties could be allocated to the development of initiatives focused on reforestation, afforestation and climate change mitigation in the Russian Federation. The proposed measure of state regulation of foreign trade in wood products can be regarded as a potential alternative to the existing customs duties on roundwood exports. It is consistent with the policy of stimulating high-value-added industries and, moreover, contributes to the achievement of national climate goals.

Keywords: *timber industry, climate projects in forestry, carbon balance, carbon tax, emission payments, Asian Russia, sawn wood*

Funding: the article was prepared under the R&D plan of the Institute of Economics and Organization of Industrial Production SB RAS, project “Driving forces and mechanisms of development of cooperation and integration processes in the Siberian economy”, No. 121040100279-5.

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

For citation: Gordeev R. V., Pyzhev A. I. (2025). Carbon tax on roundwood and sawn wood exports as a measure of national industrial and climate policy. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 133-147 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/9>

Received 01.04.2025. **Revised** 03.09.2025. **Accepted** 15.09.2025. **Published online** 25.09.2025.

Введение

В литературе последних лет фокус исследований проблем лесов России сместился в сторону двух направлений. Первое развивается в связи с климатическими изменениями, необходимостью адаптации к ним и формированию отечественной климатической и низкоуглеродной политики. Большая роль российских лесов в регулировании климатической

системы Земли может стать одним из важных природоресурсных активов нашей страны уже в ближайшие годы или десятилетия [1–3]. В связи с этим активно развивается научно-методическая основа оценки запасов углерода в лесах России на национальном и региональном уровнях [4–7].

Другое направление связано с решением проблем экономики традиционных, древесных, полез-

ностей лесов. Среди них низкий уровень добавленной стоимости в конечной продукции, нелегальные рубки, неэффективность лесовосстановления, вывоз круглого леса за рубеж, нехватка отечественной техники и прочие [8–11].

Настоящая работа продолжает цикл исследований оценки объемов эмиссии и накопления углерода в России, происходящих в результате внешней торговли лесной продукцией [12; 13]. Опираясь на полученные ранее результаты, мы предлагаем механизм углеродного регулирования внешней торговли, который потенциально может позитивно повлиять на достижение национальных целей по низкоуглеродному развитию и решение задач промышленной политики в лесном комплексе.

Механизмы климатического регулирования, как правило, сводятся к установлению углеродных налогов в сочетании со внедрением систем торговли квотами на выбросы парниковых газов [14–17]. Собранные таким образом средства должны предназначаться для реализации климатических инициатив, в частности проектов по увеличению нетто-поглощения парниковых газов наземными экосистемами.

Среди положительных сторон введения углеродного налога называют возможность использования уже отлаженной налоговой системы, контроль экспортоориентированных отраслей с повышенным уровнем выбросов, создание стимулов перехода к низкоуглеродным технологиям. К отрицательным сторонам относят сложности при выборе уровня налоговой ставки и создание нерыночных преимуществ для отдельных производителей [18; 19].

В основном идея внедрения углеродного налога обсуждается в отношении секторов, вносящих наибольший вклад в атмосферные выбросы углерода. К таким относят добычу полезных ископаемых и обрабатывающие производства, в ходе которых происходит горение ископаемого топлива [20; 21]. Лесная промышленность редко обсуждается в этом контексте, поскольку она не является крупным эмитентом парниковых газов [22]. Однако можно утверждать, что вырубка лесов снижает потенциальный объем поглощения углерода на территории страны, а экспорт изделий из древесины фактически

является потерями запасов углерода, которые могли сохраниться в древостое или быть потреблены как заготовленные лесоматериалы (ЗЛМ) внутри страны.

В зарубежной литературе исследования возможностей введения углеродного налога в лесной промышленности также встречаются нечасто. Talberth и Carlson [23] на примере США предложили специальный сбор как дополнительный платеж к налогам на объем заготовки, существующий во многих штатах. Углеродным налогом планируется облагать выбросы, возникающие при заготовке древесины и обезлесении, без учета выбросов при транспортировке и переработке древесины. Полученные средства могут быть направлены в специальный фонд для компенсации экстерналий из-за заготовки древесины и интенсификации перехода к умным климатическим технологиям в области лесного хозяйства.

Chen и др. [24] исследовали последствия введения углеродного налога на импорт заготовленных лесоматериалов в Тайване. Анализ временных рядов с помощью эконометрической модели ARDL (англ. Autoregressive Distributed Lag) показал, что спрос на импортную древесину ожидаемо отрицательно коррелирован с её ценой, но положительно — с реальным ВВП. В случае введения углеродного налога спрос на импорт бревен, пиломатериалов и целлюлозы сокращается сильнее, чем спрос на другие изделия из древесины. Индуцированный налогами рост цен на импортную продукцию приводит к необходимости удовлетворения внутреннего спроса за счет стимулирования отечественного производства, что может увеличить запасы углерода Тайваня на 10–15%.

В работе [25] на примере лесной промышленности Китая показано, что при слишком высокой цене на углерод на уровне 57,9 долл. за тонну выбросов углеродный налог будет оказывать «тормозящее» воздействие на экономику, и объем производства продукции из древесины будет снижаться. По этой причине поиск оптимальной границы диапазона цен на углерод для проведения низкоуглеродной политики и достижения климатических целей без ущерба производству является сложной и пока не решенной задачей.

В отечественной литературе тема внедрения механизмов углеродного регулирования в лесной промышленности пока не получила развития. Настоящая работа преследует цель внести вклад в разработку методов решения данного вопроса, решив следующие задачи:

1) разработать подход к оценке углеродного баланса регионов России, позволяющий в дальнейшем использовать его как основу для имплементации механизма углеродного регулирования внешней торговли;

2) дать оценку потенциального объема платежей в бюджет в случае введения дополнительного углеродного налога на экспорт необработанных лесоматериалов и пиломатериалов.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Объектом исследования выступают регионы России, предметом являются выбросы углерода в результате экспорта субъектами РФ древесной продукции низкой степени обработки.

В данной работе мы анализируем данные о внешней торговли двумя группами товаров:

1) лесоматериалы: коды 4401—4403 Таможенной номенклатуры внешнеэкономической деятельности (ТН ВЭД) Евразийского экономического союза (ЕАЭС);

2) пиломатериалы: код 4407 ТН ВЭД ЕАЭС.

Мы рассматриваем экспорт лесоматериалов и пиломатериалов как фактические потери запасов углерода для страны, а импорт — как накопление. Такой подход частично соответствует подходу атмосферного потока (англ. Atmospheric Flow Approach, AFA), описанному в рекомендациях МГЭИК по формированию национальных кадастров парниковых газов [26]. Проведенные ранее исследования показали, что именно подход атмосферного потока в большей степени отвечает интересам России с точки зрения оценки собственных запасов углерода [12; 27; 28].

Однако AFA подразумевает описанную выше методику учета только для сырьевых товаров (лесоматериалы), но не для пиломатериалов. При этом известно, что пиломатериалы зачастую выступают «товарами прикрытия» для вывоза за рубеж мини-

мально обработанной древесины. Поэтому для целей данного исследования мы считаем рациональным использовать единый подход для обеих категорий товаров.

С 2022 г. принят ряд мер, направленных на борьбу с бесконтрольным экспортом круглого леса. В частности, введены новые коды ТН ВЭД, позволяющие разграничить вывозимые лесоматериалы по глубине переработки и уровню влажности. Это позволило ввести различные ставки таможенных пошлин для товаров, принципиально отличающихся по уровню переработки. Например, для пиломатериалов влажностью более 22% толщиной не менее 100 мм и шириной не менее 100 мм установлена ставка пошлины в размере 200 евро за 1 куб. м, в то время как для аналогичных товаров с влажностью менее 22% ставка оставалась нулевой. Кроме того, вывоз лесоматериалов (4403 ТН ВЭД) хвойных и ценных пород, с 2022 г. ограничен лишь двумя железнодорожными пунктами в Республике Карелия (Люття) и Приморском крае (Хасан). Указанные меры были введены сроком на 1 год и до настоящего момента ежегодно продлялись. Очередной срок истекает в конце 2025 г.

Сбор данных

Источником данных о внешней торговле является Федеральная таможенная служба России (ФТС). С 2022 г. данные в разрезе регионов не публикуются в открытом доступе, поэтому ряд наблюдений ограничен 2021 г.

Разграничить лесоматериалы по уровню влажности для данных до 2022 г. затруднительно, поскольку ранее соответствующие коды ТН ВЭД не существовали. Поэтому в своих оценках мы рассматриваем гипотетический сценарий, при котором повышенные ставки не будут продлены, а объемы экспорта лесопроductии за рубеж сохранятся приблизительно в том же объеме, что и до 2022 г.

Мы используем конверсионные коэффициенты для перевода объемно-весовых характеристик древесной продукции в углерод, приведенные в последнем руководстве МГЭИК [26]. Они учитывают различное содержание углерода в лиственных (0,280 т С / куб. м) и хвойных (0,225 т С / куб. м) лесоматериалах. Более детальные различия в породном составе с учетом региональных особенностей не были

учтены. Признавая эти ограничения, отметим, что целью исследования является не получение максимально точных оценок углеродного следа внешней торговли, а демонстрация подхода к таможенному регулированию на основе таких оценок. Коррекция полученных результатов может стать предметом будущих работ.

Подробное описание методики оценки эмиссии углерода в результате транспортировки товаров опубликовано нами ранее в работе [12]. Для перевозок по железной дороге мы используем оценку в 10 граммов CO₂ на тонно-километр пути [29; 30], а для транспортировки морем — 10,7 граммов CO₂ на тонно-милю [31].

Анализ данных

Выбросы углерода в результате транспортировки (ЕТ) рассчитаны по следующей формуле:

$$ET = D_{ж/д} \times E_{ж/д} + D_{море} \times E_{море}, \quad (1)$$

где $D_{ж/д}$ и $D_{море}$ — расстояния от экспортера до импортера товара по железной дороге или морю в км, а $E_{ж/д}$ и $E_{море}$ — удельные объемы выбросов углерода, Мт CO₂ / км.

Тогда углеродный баланс (СВ) за год для региона с учетом выбросов при транспортировке равен:

$$CB = \sum_{p=1}^n \left(EX_p \times cf_p \times \frac{44}{12} + ET_{EX_p} \right) - \sum_{p=1}^n \left(IM_p \times cf_p \times \frac{44}{12} + ET_{IM_p} \right), \quad (2)$$

где EX_p и IM_p — объемы экспорта и импорта товара p в куб. м;

cf_p — конверсионный коэффициент для товара p , Мт С / куб. м;

ET_{EX_p} и ET_{IM_p} — эмиссия углерода при транспортировке товара p в результате экспорта и импорта, рассчитанная по формуле (1), Мт CO₂.

Все расчеты выполнены в программной среде RStudio на языке программирования R. Расстояния между контрагентами рассчитаны с помощью пакетов *osrm* [32], *stplanr* [33], *mapview* [34]. Визуализация полученных результатов реализована с помощью пакета *ggplot2* [35].

Результаты

Используя формулы (1)–(2), мы получили оценки углеродного баланса внешней торговли для регионов России по доступным данным за 2016–2021 гг.

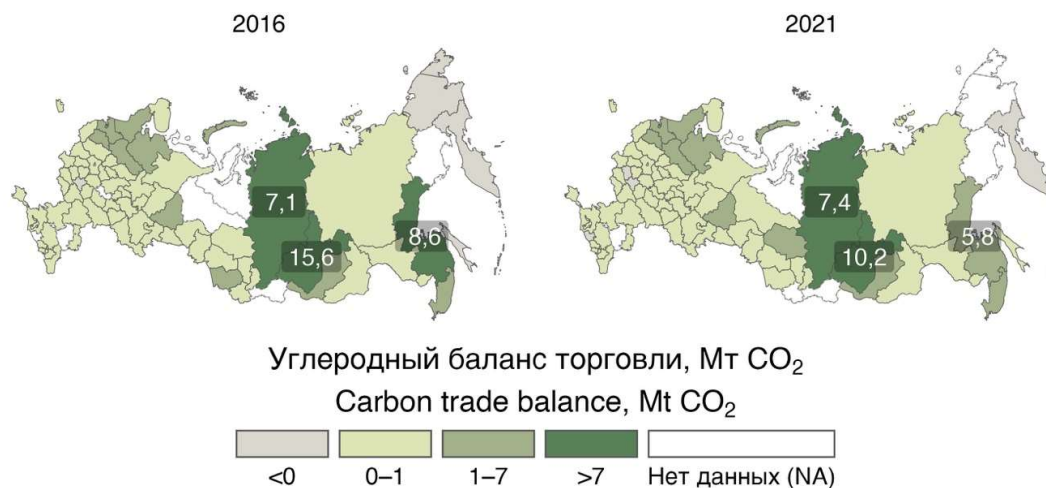


Рисунок 1. Динамика углеродного баланса в регионах России 2016–2021 гг., Мт CO₂.

Figure 2. Changes in the carbon balance in Russ. regions between 2016 and 2021, Mt CO₂

Источник: составлено авторами

Source: authors' calculation and visualization

Видно, что распределение объемов эмиссии углерода в высокой степени устойчиво и слабо изменяется во времени. География распределения значений углеродного баланса соответствует регионам присутствия крупнейших лесопромышленных предприятий, сосредоточенных на Северо-Западе России, в Сибири и на Дальнем Востоке. Однако северо-западные регионы с развитой целлюлозно-бумажной промышленностью все же уступают регионам Азиатской части России с точки зрения объемов экспорта круглого леса и пиломатериалов. Безусловными лидерами экспорта в углеродном выражении являются Иркутская область, Красноярский и Хабаровский края. Вместе с тем наблюдается тенденция сокращения эмиссии со временем, что объясняется постепенным снижением вывоза круглого леса.

Отметим, что структура внешней торговли по сравнению с 2016 г. менялась неравномерно. В регионах Северо-Запада в 2021 г. наблюдается существенное увеличение объемов экспортируемых лесоматериалов за счет дополнительного спроса со стороны торговых партнеров на фоне новостей о принятии закона о запрете вывоза необработанной древесины. Вместе с тем в регионах Азиатской части России и доля лесоматериалов, и общие объемы их продаж за рубеж в натуральном выражении значительно сокращались.

Полученные нами оценки эмиссии углерода могут быть представлены в денежном выражении для дальнейшей разработки механизма углеродного регулирования. Недостаток стимулирования отечественных компаний к производству товаров с более высокой добавленной стоимостью может быть восполнен за счет введения таможенных пошлин на соответствующую продукцию из древесины, в частности лесоматериалов и минимально обработанных пиломатериалов [13; 36]. Экспорт необработанной древесины может быть интерпретирован как потери национальных запасов углерода, которые могли быть сохранены в лесах или лесопромышленной продукции, потребленной на территории страны. Поэтому оптимальный уровень таможенной пошлины может быть рассчитан через оценку объема углерода в лесоматериалах и пиломатериалах с добавлением выбросов при транспортировке этих товаров.

Установление цены на углерод требует поиска баланса между величиной посылных для производителя издержек и необходимостью достаточного объема сборов для дальнейшего финансирования климатических проектов [22; 37–39]. Так, цена углеродных квот в Системе торговли квотами на выбросы в ЕС (European Union's Greenhouse Gas Emissions Trading System, EU-ETS) в последние пять лет была крайне волатильна. С 2011 по 2017 гг. цена оставалась стабильно ниже 10 евро за 1 т CO₂. Однако в июле 2019 г. они выросли втрое до 30 евро и постепенно достигли 96 евро в феврале 2022 г. [40]. Спустя год, в марте 2023 г. был установлен новый ценовой рекорд – она поднялась выше 106 евро, после чего цены постепенно снижались и составляют на март 2025 г. 73 евро за 1 т CO₂ [41].

В России углеродные единицы торгуются на Национальной товарной бирже, входящей в группу Московской биржи. Первые торги на символическую сумму в 20 углеродных единиц состоялись 26 сентября 2022 г., цена продажи составила 1000 рублей за единицу [42]. Год спустя в ходе первого крупного аукциона ПАО «СИБУР Холдинг» продала 2735 углеродных единиц по цене 700 рублей за т CO₂ [43].

Используя условную цену в 1000 руб. за тонну CO₂, при объемах экспорта на уровне 2021 г. мы оцениваем платежи за общие выбросы от экспорта круглого леса и пиломатериалов в размере 65,7 млрд руб. Это составляет 2,2 % общей выручки и 14,2 % чистой прибыли всех российских лесозаготовительных компаний по данным за 2021 г. [44], что является внушительной, но не запретительно высокой величиной. При этом на круглый лес и пиломатериалы приходится примерно одинаковые объемы платежей: 33,3 и 32,3 млрд руб., соответственно.

В пространственном разрезе объемы платежей распределены неравномерно. По состоянию на 2021 г. четыре региона являются нетто-импортерами древесного сырья, ещё по семи данные о внешней торговле отсутствуют. Поэтому предметом для рассмотрения возможности введения пошлин являются 74 субъекта РФ. Десять регионов с наибольшим размером платежей формируют 75% общего объема потенциальной суммы налогов (рисунок 2).

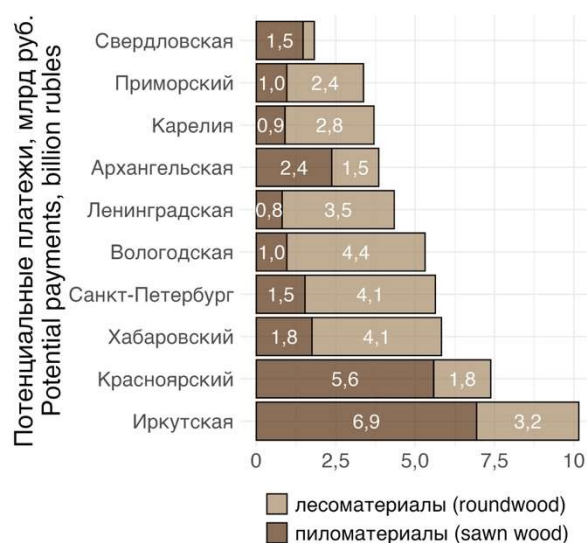


Рисунок 2. Регионы-лидеры по объему потенциальных углеродных платежей, млрд руб.

Figure 2. Leading regions in terms of potential carbon payments, billion rubles

Источник: составлено авторами

Source: authors' calculation and visualization

Ожидаемо лидирующие позиции занимают регионы Сибири и Дальнего Востока: Иркутская область, Красноярский и Хабаровский края. Также в числе десятки лидеров находятся регионы СЗФО. На четвертом месте располагается Санкт-Петербург за счет портовой инфраструктуры и формального отношения части торговых потоков на этот регион.

Представляется, что именно регионы Азиатской части России ввиду традиционно сырьевой ориентации экспорта, могли бы извлечь наибольшую пользу при введении такого платежа. Отметим, что планируемое сокращение экспорта не обязательно должно означать стагнацию отрасли. При развитии отечественного производства товаров с высокой добавленной стоимостью также необходимо значительное количество сырья: например, на каждую тонну бумаги приходится порядка 4 куб. м древесины [13].

Ключевым вопросом является дальнейшее распределение собранных углеродных платежей за экспорт. Мы рассматриваем в качестве одной из основных задач предложенного механизма регулирования торговли вклад в достижение целей национальной климатической политики. Вырученные

средства могли бы накапливаться в специальном фонде, который бы финансировал лесоклиматические проекты в России. К таким проектам можно отнести инициативы в области лесоразведения, лесовосстановления, повышения качества лесопользования, удобрения лесов [45; 46]. Согласно оценкам Центра ответственного природопользования Института географии РАН, окупаемость проектов по добровольному сохранению лесов высокой природоохранной ценности, по защитному лесоразведению, восстановлению осушенных торфяников и некоторых лесопожарных проектов достижима при цене 10 долл. США за 1 тонну выбросов парниковых газов [47], что в целом соответствует цене, принятой нами за ориентир в расчетах. Особое внимание следует обратить на возможность реализации проектов по использованию ЗЛМ и древесных отходов в результате заготовки. Они подразумевают сокращение эмиссии углерода в атмосферу за счет производства биотоплива или замены заготовленными лесоматериалами других строительных материалов, произведенных с сопутствующими выбросами парниковых газов [46].

В мировой практике проекты, связанные с лесами, доминируют в общей структуре климатических проектов, занимая 54% [48]. Однако в отечественном реестре зарегистрированы в основном технологические проекты [Там же]. Исключения достаточно редки и сосредоточены на Дальнем Востоке: Приморском крае, Сахалинской области. В последние годы интерес к лесоклиматическим проектам проявляют и крупные корпорации, заинтересованные в компенсации собственных выбросов для подтверждения приверженности принципам ESG (англ. Environmental, Social and Corporate Governance) и продолжения работы с внешнеторговыми партнерами, планирующими введение трансграничного углеродного регулирования [49; 50]. Тем не менее, потенциал развития лесоклиматических проектов в России пока мало раскрыт, ввиду целого ряда неоднократно озвученных причин: непроработанности нормативной базы, дефицита мощностей производства лесопосадочного материала, высоким квалификационным требованиям к кадрам для реализации

проекта, повышенным природным рискам, которые трудно контролировать [13; 46].

Обсуждение

Мы предложили механизм углеродного регулирования как одно из возможных направлений для достижения национальных климатических целей и целей стимулирования производства товаров с высокой добавленной стоимостью. Результаты демонстрируют, что даже с относительно небольшим бременем для компаний, эта инициатива может создать фонд для будущего развития лесных климатических проектов. Похожий механизм был предложен в работе [51], где было показано, что введение углеродного налога на экспорт в Китае сократит экспорт энергоемких товаров, увеличивая при этом производство и экспорт товаров с высокой добавленной стоимостью и снижая прямую эмиссию углерода от экспорта. Наши результаты также соответствуют исследованиям по лесной промышленности, которые предполагают, что ограничения экспорта могут быть потенциально полезны для отечественной индустрии и помогают достичь целей климатической политики [23; 25; 36; 52; 53].

Следует признать некоторые ограничения полученных результатов. Так, наши оценки основаны на предположении об исходно высоких уровнях экспорта, которые в дальнейшем могут сократиться по причине как непосредственно введения механизма углеродного регулирования, так и других мер политики, направленной на повышение уровня добавленной стоимости внутри страны.

По причинам недоступности актуальных данных мы опирались на данные о внешней торговле до 2022 г. Очевидно, что в настоящее время география торговли лесопромышленной продукцией существенно изменилась. Однако ее структура в целом остается достаточно стабильной в краткосрочном периоде: малообработанные лесоматериалы и пиломатериалы будут и в дальнейшем пользоваться спросом на мировом рынке, что создает риски экономически необоснованного роста рубок в регионах Азиатской части России.

По вышеуказанным причинам полученная нами оценка в целом может восприниматься как верхний потенциальный предел. Кроме того, стимулирование производства товаров высоких переделов

в будущем также изменит структуру и объемы эмиссии углерода, возникающей в ходе деятельности лесопромышленных компаний внутри страны. В данной работе мы рассматриваем лишь внешнеторговую деятельность, однако перед рассмотрением возможностей введения предложенной политики резервуары углерода, возникающие в результате производства и потребления продукции из древесины внутри страны, также должны быть оценены для регионов России. Это может стать направлением дальнейших исследований.

Заключение

Большие лесные площади, спрос со стороны азиатских рынков и по-прежнему низкая себестоимость лесозаготовки создают сравнительные преимущества отечественным производителям в торговле малообработанной лесопромышленной продукцией. Сохранение перечисленных факторов ведет к тому, что национальные лесные богатства используются неэффективно, становясь предметом дешевого сырьевого экспорта. При этом зачастую Россия вынуждена импортировать товары с высокой добавленной стоимостью, произведенные из российского же леса. Новые таможенные пошлины, введенные с 2022 г., призваны внести вклад в решение этой проблемы. Тем не менее вопрос о продлении этих пошлин остается актуальным.

Предложенная нами мера по введению платежей за эмиссию при экспорте таких товаров может рассматриваться как альтернатива существующим пошлинам и возможность стимулировать производителей к повышению добавленной стоимости, одновременно внося вклад в достижение национальных климатических целей. При объемах отечественной внешней торговли на уровне 2021 года потенциальный объем платежей может составить 65,7 млрд руб. Ключевая роль в наполнении фонда отводится регионам Сибири, Дальнего Востока и Северо-Запада России как наиболее значимым экспортерам древесного сырья.

Если предлагаемый механизм регулирования торговли будет рассматриваться как часть национальной системы управления выбросами углерода, появится возможность использовать небольшую часть доходов от лесной промышленности для финансирования лесоклиматических проектов. Этот

подход может внести важный вклад в достижение национальных целей по углеродной нейтральности с помощью практических экономических механизмов и создать долгожданные стимулы для увеличения глубины переработки древесины в России.

Список литературы

1. Лукина Н.В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90. – № 6. – С. 528—532. – DOI: 10.31857/S0869587320060080. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42995033>
2. Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А., Байбар А.С. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в её реализации // Вестник Российской академии наук. 2023. – Т. 93. – № 1. – С. 36—49. – DOI: 10.31857/S0869587323010073. – URL: <https://elibrary.ru/ENEITI>
3. Перспективы реализации лесоклиматических проектов: потенциал регионов Енисейской Сибири: флагманский аналитический доклад / ред.: Е.А. Ваганов, А.И. Пыжев, М.В. Курбатова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – 160 с. – URL: <https://www.sfu-kras.ru/files/NOC-doklad.pdf> (дата обращения: 27.03.2025)
4. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported / D. Schepaschenko, E. Moltchanova, S. Fedorov (et al.) // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. Art. no. 12825. –DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9
5. Ваганов Е.А., Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Пыжев А.И. Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. – 2021. – Т. 17. – № 4. – С. 1096—1109. – DOI: 10.17059/EKON.REG.2021-4-4. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47490907>
6. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации / В.Н. Коротков, А.А. Романовская, Д.В. Карелин [и др.]; под ред. А.А. Романовской. – М.: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 2023. – 345 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=56147005>
7. Сорокина Д.Д., Птичников А.В., Романовская А.А. Сравнительный анализ и оценка методик расчета поглощения парниковых газов лесными экосистемами, применяемых в Российской Федерации // Известия российской академии наук. Серия географическая. 2023. – Т. 87. – № 4. – С. 497—511. – DOI: 10.31857/S2587556623040131. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54378905>
8. Иванцова Е.Д. Механизмы стимулирования инвестиций в лесной сектор экономики: анализ мирового опыта в контексте целесообразности его применения в России // Вестник Пермского университета. Серия: экономика. – 2020. – Т. 15. – № 4. – С. 566—586. – DOI: 10.17516/1997-1370-157-0900. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44461083>
9. Антонова Н.Е. Деревянное домостроение как драйвер спроса на лесопромышленную продукцию на Дальнем Востоке // ЭКО. – 2025. – № 1 (600). – С. 71—88. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2025-1-71-88. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80300595>
10. Антонова Н.Е. Исследование эффективности использования лесных ресурсов региона в период экономической нестабильности // Власть и управление на востоке России. – 2024. – № 4 (109). – С. 61—69. – DOI: 10.22394/1818-4049-2024-109-4-61-69. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=79704663>
11. Шишелов М.А., Носков В.А. Оценка ресурсной эффективности лесного комплекса России: методология и практика // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2023. – Т. 21. – № 3. – С. 124—144. – DOI: 10.47711/2076-3182-2023-3-124-144. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59997085>
12. Gordeev R.V., Pyzhev A.I. Evaluating carbon emissions and removals resulting from Russia's trade in harvested wood products // Forest Policy and Economics. – 2025. – Vol. 172. – Art. no. 103444. – DOI: 10.1016/j.forpol.2025.103444
13. Пыжев А.И., Гордеев Р.В., Зандер Е.В., Пыжева Ю.И. Углеродное регулирование как инструмент государственной политики стимулирования глубокой переработки лесного сырья в России // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. – 2024. – Т. 17. – № 6. – С. 1183—1191. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67973211>
14. Горбачева Н.В. Экономическая эффективность климатических проектов: традиционный и темпоральный подходы // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2024. – Т. 28. – № 4. – С. 587—614. – DOI: 10.17323/1813-8691-2024-28-4-587-614. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=75183563>

15. Исмагилова О.Д. Ценообразование на углеродные выбросы: мировой опыт // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2023. – Т. 39. – № 4. – С. 470—495. – DOI: 10.21638/spbu05.2023.402. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59720119>
16. Макаров И.А. Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2013. – Т. 17. – № 3. – С. 479—496. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20813399>
17. Порфирьев Б.Н. «Зеленые» тенденции в мировой финансовой системе // Мировая экономика и международные отношения. – 2016. – Т. 60. – № 9. – С. 5—16. – DOI: 10.20542/0131-2227-2016-60-9-5-16. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26637968>
18. Глазырина И.П. Проблемы экологически неравноценного обмена в XXI веке // ЭКО. – 2021. – Т. 51. – № 9. – С. 94—124. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-9-94-124. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46527514>
19. Мотосова Е.А., Потравный И.М. Плюсы и минусы введения углеродного налога: зарубежный опыт и позиция России по Киотскому протоколу // ЭКО. – 2014. – № 7 (481). – С. 180—189. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21819993>
20. Hájek M., Zimmermannová J., Helman K., Rozenský L. Analysis of carbon tax efficiency in energy industries of selected EU countries // Energy Policy. – 2019. – Vol. 134. – Art. no. 110955. – DOI: 10.1016/j.enpol.2019.110955
21. Wang Y., Li L., Yin R. A primer on forest carbon policy and economics under the Paris Agreement: Part I // Forest Policy and Economics. – 2021. – Vol. 132. – Art. no. 102595. – DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102595
22. van Kooten G.C. Forest carbon offsets and carbon emissions trading: Problems of contracting : Special section on The economics of carbon sequestration in forestry // Forest Policy and Economics. – 2017. – Vol. 75. – Pp. 83—88. – DOI: 10.1016/j.forpol.2016.12.006
23. Talberth J., Carlson E. Forest carbon tax and reward: regulating greenhouse gas emissions from industrial logging and deforestation in the US // Environment, Development and Sustainability. – 2024. – DOI: 10.1007/s10668-024-04523-7
24. Chen P.-Y., Chen B.-Y., Tsai P.-H., Chen C.-C. Evaluating the impacts of a carbon tax on imported forest products—evidence from Taiwan // Forest Policy and Economics. – 2015. – Vol. 50. – Pp. 45—52. – DOI: 10.1016/j.forpol.2014.07.012
25. Liu J., Wu F. Forest Carbon Sequestration Subsidy and Carbon Tax as Part of China's Forestry Policies // Forests. – 2017. – Vol. 8. – No. 3. – Art. no. 58. – DOI: 10.3390/f8030058
26. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Intergovernmental Panel on Climate Change. – Switzerland: IPCC, 2019. – URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> (дата обращения: 05.11.2023)
27. Грабар В.А. Оценка бюджета углерода в изъятый при лесозаготовках биомассе // Лесоведение. 2007. – № 5. – С. 12—21. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9534329>
28. Грабар В.А., Гитарский М.Л. Оценка депонирования атмосферного углерода в лесной продукции // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 4. – С. 23—29. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16515527>
29. Railway Handbook / International Energy Agency, International Union of Railways, 2017. – 120 p. – URL: <https://www.iea.org/reports/railway-handbook-2017>
30. Влияние экологической повестки на международные железнодорожные грузоперевозки / Eurasian Rail Alliance Index, 2020. – 16 с. – URL: https://index1520.com/upload/medialibrary/e9a/OTLK-eco-ru_3.pdf
31. Fourth IMO GHG Study / IMO. London: International Maritime Organization, 2020. – 524 p. – URL: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20Executive-Summary.pdf> (дата обращения: 11.03.2025)
32. osrm: Interface Between R and the OpenStreetMap-Based Routing Service OSRM. – 2024. – URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/osrm/> (дата обращения: 05.02.2025).
33. stplanr: Sustainable Transport Planning. – 2024. – URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/stplanr/index.html> (дата обращения: 05.02.2025).
34. mapview: Interactive Viewing of Spatial Data in R. – 2023. – URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/mapview/index.html> (дата обращения: 05.02.2025).
35. ggplot2. – 2024. – URL: <https://ggplot2.tidyverse.org/index.html> (дата обращения: 15.11.2024).
36. van Kooten G.C., Johnston C. Global impacts of Russian log export restrictions and the Canada–U.S. lumber dispute: Modeling trade in logs and lumber // Forest Policy and Economics. – 2014. – Vol. 39. – Pp. 54—66. – DOI: 10.1016/j.forpol.2013.11.003
37. Li L., Zhang D. Forest carbon offset protocols in compliance carbon markets // Forest Policy and Economics. – 2024. – Vol. 165. – Art. no. 103253. – DOI: 10.1016/j.forpol.2024.103253
38. Rossi D.J., Baker J.S., Abt R.C. Quantifying additionality thresholds for forest carbon offsets in Mississippi pine pulpwood markets // Forest Policy and Economics. – 2023. – Vol. 156. Art. no. 103059. – DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103059

39. Куричев Н.К., Птичников А.В., Шварц Е.А., Кренке А.Н. Природно-климатические проекты в России: ключевые проблемы и условия успеха // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87. – № 4. – С. 619—636. – DOI: 10.31857/S2587556623040040. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54378912>
40. Emission allowances and associated derivatives: final report / ESMA. Paris, France: European Securities and Markets Authority, 2022. – 143 p. – URL: https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma70-445-38_final_report_on_emission_allowances_and_associated_derivatives.pdf (дата обращения: 18.02.2025)
41. European Commission. EU Emissions Trading System (EU ETS) / EU Emissions Trading System, 2025. – URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (дата обращения: 20.03.2025).
42. Попова И.М., Колмар О.И. Низкоуглеродное развитие России: вызовы и возможности в новых условиях // Вестник международных организаций. – 2023. – Т. 18. – № 4. – С. 62—95. – DOI: 10.17323/1996-7845-2023-04-03. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=64200233>
43. ТАСС. «Сибур» провел первые в РФ крупные биржевые сделки по продаже углеродных единиц // ТАСС, 2023. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/19421289> (дата обращения: 20.03.2025).
44. ForestComplex.ru. Аналитики: в 2021 году российский ЛПК добился рекордной выручки // ForestComplex.ru — Портал о лесозаготовке и деревообработке. 13.12.2022. – URL: <https://forestcomplex.ru/finansy/analitiki-v-2021-godu-rossijskij-lpk-dobilysya-rekordnoj-vyruchki/> (дата обращения: 27.03.2025).
45. Антонова Н.Е., Дзюба Н.А. Лесоклиматические проекты как новый приоритет стратегического развития лесного комплекса региона // Регионалистика. – 2024. – Т. 11. – № 1. – С. 5—23. – DOI: 10.14530/reg.2024.1.5. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65613045>
46. Коротков В.Н. Лесные климатические проекты в России: ограничения и возможности // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 39—46. – DOI: 10.21685/2500-0578-2022-4-3. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50385462>
47. Шварц Е.А., Кокорин А.О., Птичников А.В., Кренке А.Н. Трансграничное углеродное регулирование и леса России: от ожиданий и мифов к реализации интересов // Экономическая политика. – 2022. – Т. 17. – № 5. – С. 54—77. – DOI: 10.18288/1994-5124-2022-5-54-77. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54043543>
48. Львова Н.А. Формирование финансовой модели углеродного регулирования в контексте целей декарбонизации Российской Федерации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2024. – Т. 40. – № 3. – С. 387—415. – DOI: 10.21638/spbu05.2024.303. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73239484>
49. Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Часть 1 / Г.А. Фоменко, А.А. Романовская, М.А. Фоменко [и др.] // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 2. – С. 91—106. – DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48728483>
50. Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Часть 2 / Г.А. Фоменко, А.А. Романовская, М.А. Фоменко [и др.] // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 3. – DOI: 10.24412/1728-323X-2022-3-65-74. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49327696>
51. Li J.F., Wang X., Zhang Y.X. Is it in China's interest to implement an export carbon tax? // Energy Economics. – 2012. – Vol. 34. – No. 6. – Pp. 2072—2080. – DOI: 10.1016/j.eneco.2012.02.012
52. Lenglet J., Courtonne J.-Y., Cauria S. Material flow analysis of the forest-wood supply chain: A consequential approach for log export policies in France // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 165. – Pp. 1296—1305. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.177
53. Sasaki N. Timber production and carbon emission reductions through improved forest management and substitution of fossil fuels with wood biomass // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 173. – Art. no. 105737. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105737

References

1. Lukina N.V. *Global'nye vyzovy i lesnye ekosistemy* [Global challenges and forest ecosystems]. Vestnik Rossijskoj akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. 90. 6: 528—532. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869587320060080. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42995033>
2. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Popova G.A., Baibar A.S. *Strategiya nizkouglerodnogo razvitija Rossii i rol' lesov v ejo realizacii* [Low-carbon development strategy of Russia and the role of forests in its realization]. Vestnik Rossijskoj akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023. 93. 1: 36—49. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869587323010073. URL: <https://elibrary.ru/ENEITI>
3. *Perspektivy realizacii lesoklimaticheskikh projektov: potencial regionov Enisejskoj Sibiri: flagmanskij analiticheskij doklad* [Prospects for the realization of forest-climatic projects: the potential of the regions of Yenisei Siberia: flagship analytical report]. E.A. Vaganov, A.I. Pyzhev, M.V. Kurbatova (eds.). Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023. 160 p. (In Russ.). URL: <https://www.sfu-kras.ru/files/NOC-doklad.pdf>

4. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. (et al.). *Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported*. Scientific Reports. 2021. 11. 1: 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9
5. Vaganov E.A., Porfiriev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Yu. *Ocenka vklada rossijskikh lesov v snizhenie riskov klimaticeskikh izmenenij* [Assessment of the contribution of Russian forests to climate change mitigation]. *Jekonomika regiona* = Economy of Regions. 2021. 17. 4: 1096—1109. (In Russ.). DOI: 10.17059/EKON.REG.2021-4-4. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47490907>
6. V.N. Korotkov, A.A. Romanovskaya, D.V. Karelin (et al.). *Ocenka potokov parnikovyh gazov v jekosistemah regionov Rossijskoj Federacii* [Assessment of greenhouse gas fluxes in ecosystems of the Russian Federation regions]. ed. by A.A. Romanovskaya. Moscow: Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. 2023. 345 p. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=56147005>
7. Sorokina D.D., Ptichnikov A.V., Romanovskaya A.A. *Sravnitel'nyj analiz i ocenka metodik rascheta pogloshheniya parnikovyh gazov lesnymi jekosistemami, primenjaemyh v Rossijskoj Federacii* [Comparative analysis and assessment of methodologies applied in the Russian Federation for calculating greenhouse gas absorption by forest ecosystems]. *Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2023. 87. 4: 497—511. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2587556623040131. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54378905>
8. Ivantsova E.D. *Mehanizmy stimulirovaniya investicij v lesnoj sektor jekonomiki: analiz mirovogo opyta v kontekste celesoobraznosti ego primeneniya v Rossii* [Investment Encouragement Mechanisms in Forestry Sector: Analysis of Global Experience and its Viability in Russia]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: jekonomika* = Perm University Herald. Economy. 2020. 15. 4: 566—586. (In Russ.). DOI: 10.17516/1997-1370-157-0900. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44461083>
9. Antonova N.E. *Derevjannoe domostroenie kak drajver sprosa na lesopromyshlennuju produkciju na Dal'nem Vostoke* [Timber House Building as a Driver of Demand for Timber Products in the Far East]. *EKO* = ECO. 2025. 1. 600: 71—88. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2025-1-71-88. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80300595>
10. Antonova N.E. *Issledovanie jeffektivnosti ispol'zovaniya lesnyh resursov regiona v period jekonomicheskoy nestabil'nosti* [Efficiency of Forest Resource Usage in the Region During the Period of Economic Instability]. *Vlast' i upravlenie na vostoce Rossii* = Power and Administration in the East of Russia. 2024. 4. 109: 61—69. (In Russ.). DOI: 10.22394/1818-4049-2024-109-4-61-69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=79704663>
11. Shishelov M.A., Noskov V.A. *Ocenka resursnoj jeffektivnosti lesnogo kompleksa Rossii: metodologija i praktika* [Assessment of the Resource Efficiency of the Forest Complex of Russia: Methodology and Practice]. *Nauchnye trudy: Institut narodnohozjajstvennogo prognozirovaniya RAN* = Scientific works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences. 2023. 21. 3: 124—144. (In Russ.). DOI: 10.47711/2076-3182-2023-3-124-144. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59997085>
12. Gordeev R.V., Pyzhev A.I. *Evaluating carbon emissions and removals resulting from Russia's trade in harvested wood products*. *Forest Policy and Economics*. 2025. 172: 103444. DOI: 10.1016/j.forpol.2025.103444
13. Pyzhev A.I., Gordeev R.V., Zander E.V., Pyzheva Yu.I. *Uglerodnoe regulirovanie kak instrument gosudarstvennoj politiki stimulirovaniya glubokoj pererabotki lesnogo syr'ja v Rossii* [Carbon Regulation as a Tool of Public Policy to Stimulate Deep Processing of Forest Raw Materials in Russia]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Gumanitarnye nauki* = Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences. 2024. 17. 6: 1183—1191. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67973211>
14. Gorbacheva N.V. *Jekonomicheskaja jeffektivnost' klimaticeskikh projektov: tradicionnyj i temporal'nyj podhody* [Economic Efficiency of Climatic Projects: Conventional and Temporal Approaches] *Jekonomicheskij zhurnal Vysshej shkoly jekonomiki* = Higher School of Economics Economic Journal. 2024. 28. 4: 587—614. (In Russ.). DOI: 10.17323/1813-8691-2024-28-4-587-614. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=75183563>
15. Ismagilova O.D. *Cenoobrazovanie na uglerodnye vybrosy: mirovoj opyt* [Carbon Pricing World Wide]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Jekonomika* = St. Petersburg University Journal of Economic Studies. 2023. 39. 4: 470—495. (In Russ.). DOI: 10.21638/spbu05.2023.402. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59720119>
16. Makarov I.A. *Global'noe izmenenie klimata kak vyzov mirovoj jekonomike i jekonomicheskoy nauke* [Global Climate Change as a Challenge to World Economy and Economic Science]. *Jekonomicheskij zhurnal Vysshej shkoly jekonomiki* = Higher School of Economics Economic Journal. 2013. 17. 3: 479—496. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20813399>
17. Porfir'ev B.N. *«Zelenye» tendencii v mirovoj finansovoj sisteme* [Green Trends in the Global Financial System]. *Mirovaja jekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya* = World Economy and International Relations. 2016. 60. 9: 5—16. (In Russ.). DOI: 10.20542/0131-2227-2016-60-9-5-16. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26637968>
18. Glazyrina I.P. *Problemy jekologicheskogo neravnocennogo obmena v XXI veke* [Problems of Environmentally Unequal Exchange in the 21st Century]. *EKO* = ECO. 2021. 51. 9: 94—124. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-9-94-124. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46527514>

19. Motosova E.A., Potravnyy I.M. *Pljusy i minusy vvedeniya uglerodnogo naloga: zarubezhnyy opyt i pozicija Rossii po Kiotskomu protokolu* [The Pros and Cons of Introducing a Carbon Tax: an Analysis of Foreign Experience]. EKO = ECO. 2014. 7. 481: 180—189. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21819993>
20. Hájek M., Zimmermannová J., Helman K., Rozenský L. *Analysis of carbon tax efficiency in energy industries of selected EU countries*. Energy Policy. 2019. 134: 110955. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.110955
21. Wang Y., Li L., Yin R. *A primer on forest carbon policy and economics under the Paris Agreement: Part I*. Forest Policy and Economics. 2021. 132: 102595. DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102595
22. van Kooten G.C. *Forest carbon offsets and carbon emissions trading: Problems of contracting: Special section on the economics of carbon sequestration in forestry*. Forest Policy and Economics. 2017. 75: 83—88. DOI: 10.1016/j.forpol.2016.12.006
23. Talberth J., Carlson E. *Forest carbon tax and reward: regulating greenhouse gas emissions from industrial logging and deforestation in the US*. Environment, Development and Sustainability. 2024. DOI: 10.1007/s10668-024-04523-7
24. Chen P.-Y., Chen B.-Y., Tsai P.-H., Chen C.-C. *Evaluating the impacts of a carbon tax on imported forest products—evidence from Taiwan*. Forest Policy and Economics. 2015. 50: 45—52. DOI: 10.1016/j.forpol.2014.07.012
25. Liu J., Wu F. *Forest Carbon Sequestration Subsidy and Carbon Tax as Part of China's Forestry Policies*. Forests. 2017. 8. 3: 58. DOI: 10.3390/f8030058
26. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Intergovernmental Panel on Climate Change*. Switzerland: IPCC, 2019. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
27. Grabar V.A. *Ocenka bjudzhetnogo ugleroda v iz'jatoj pri lesozagotovkah biomasse* [Estimation of the carbon budget in the biomass removed during logging]. Lesovedenie. 2007. 5: 12—21. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9534329>
28. Grabar V.A., Gitsarskii M.L. *Ocenka deponirovaniya atmosfernogo ugleroda v lesnoj produkcii* [Assessment of Atmospheric Carbon Sequestration in Forest Products]. Meteorologija i gidrologija = Russian Meteorology and Hydrology. 2008. 4: 23—29. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16515527>
29. *Railway Handbook*. International Energy Agency, International Union of Railways, 2017. 120 p. URL: <https://www.iea.org/reports/railway-handbook-2017>
30. *Vlijanie jeologicheskoy povestki na mezhdunarodnye zhelezнодорожные грузоперевозки* [Impact of the environmental agenda on international rail freight transportation]. Eurasian Rail Alliance Index, 2020. 16 p. (In Russ.). URL: https://index1520.com/upload/medialibrary/e9a/OTLK-eco-ru_3.pdf
31. *Fourth IMO GHG Study* / IMO. London: International Maritime Organization, 2020. 524 p. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20Executive-Summary.pdf> (accessed: 11.03.2025)
32. *osrm: Interface Between R and the OpenStreetMap-Based Routing Service OSRM*. 2024. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/osrm/> (accessed: 05.02.2025).
33. *stplanr: Sustainable Transport Planning*. 2024. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/stplanr/index.html> (accessed: 05.02.2025).
34. *mapview: Interactive Viewing of Spatial Data in R*. 2023. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/mapview/index.html> (accessed: 05.02.2025).
35. *ggplot2*. 2024. URL: <https://ggplot2.tidyverse.org/index.html> (accessed: 15.11.2024).
36. van Kooten G.C., Johnston C. *Global impacts of Russian log export restrictions and the Canada–U.S. lumber dispute: Modeling trade in logs and lumber*. Forest Policy and Economics. 2014. 39: 54—66. DOI: 10.1016/j.forpol.2013.11.003
37. Li L., Zhang D. *Forest carbon offset protocols in compliance carbon markets*. Forest Policy and Economics. 2024. 165: 103253. DOI: 10.1016/j.forpol.2024.103253
38. Rossi D.J., Baker J.S., Abt R.C. *Quantifying additionality thresholds for forest carbon offsets in Mississippi pine pulpwood markets*. Forest Policy and Economics. 2023. 156: 103059. DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103059
39. Kurichev N.K., Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Krenke A.N. *Prirodno-klimaticheskie proekty v Rossii: ključevye problemy i uslovija uspeha* [Nature-Based Offsets in Russia: Key Challenges and Conditions for Success]. Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2023. 87. 4: 619—636. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2587556623040040. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54378912>
40. *Emission allowances and associated derivatives: final report* / ESMA. Paris, France: European Securities and Markets Authority, 2022. 143 p. URL: https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma70-445-38_final_report_on_emission_allowances_and_associated_derivatives.pdf (accessed: 18.02.2025)
41. European Commission. *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. 2025. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (accessed: 20.03.2025).

42. Popova I.M., Kolmar O.I. *Nizkouglerodnoe razvitie Rossii: vyzovy i vozmozhnosti v novyh usloviyah* [Russia's Low Carbon Development Policy: Opportunities and Constraints in the New Economic and Political Reality]. *Vestnik mezhdunarodnyh organizacij* = International Organisations Research Journal. 2023. 18. 4: 62—95. (In Russ.). DOI: 10.17323/1996-7845-2023-04-03. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=64200233>
43. TASS. *“Sibur” provel pervye v RF krupnye birzhevye sdelki po prodazhe uglerodnyh edinits* [“Sibur” conducted the first major exchange transactions in the Russian Federation for the sale of carbon units]. TASS. 2023. (In Russ.). URL: <https://tass.ru/ekonomika/19421289> (accessed: 20.03.2025).
44. ForestComplex.ru. *Analitiki: v 2021 godu rossijskij LPK dobilsja rekordnoj vyruchki* [Analysts: in 2021 the Russian timber industry achieved record revenue] ForestComplex.ru — Portal o lesozagotovke i derevoobrabotke = ForestComplex about logging and woodworking. 13.12.2022. (In Russ.). URL: <https://forestcomplex.ru/finansy/analitiki-v-2021-godu-rossijskij-lpk-dobilsya-rekordnoj-vyruchki/> (accessed: 27.03.2025).
45. Antonova N.E., Dzyuba N.A. *Lesoklimaticheskie proekty kak novyy prioritet strategicheskogo razvitiya lesnogo kompleksa regiona* [Forest Climate Projects as a New Priority for the Strategic Development of the Region's Forest Complex]. *Regionalistika* = Regionalistics. 2024. 11. 1: 5—23. (In Russ.). DOI: 10.14530/reg.2024.1.5. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65613045>
46. Korotkov V.N. *Lesnye klimaticheskie proekty v Rossii: ogranicheniya i vozmozhnosti* [Forest climate projects in Russia: constraints and opportunities]. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022. 7. 4: 39—46. (In Russ.). DOI: 10.21685/2500-0578-2022-4-3. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50385462>
47. Shvarts E.A., Kokorin A.O., Ptichnikov A.V., Krenke A.N. *Transgranichnoe uglerodnoe regulirovanie i lesa Rossii: ot ozhidaniy i mifov k realizacii interesov* [Cross-Border Carbon Regulation and Forests in Russia: from Expectations and Myth to Realization of Interests]. *Jekonomicheskaja politika* = Economic Policy. 2022. 17. 5: 54—77. (In Russ.). DOI: 10.18288/1994-5124-2022-5-54-77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54043543>
48. Lvova N.A. *Formirovanie finansovoy modeli uglerodnogo regulirovaniya v kontekste celej dekarbonizacii Rossijskoj Federacii* [Forming a Financial Model of Carbon Regulation in the Context of the Decarbonization Objectives for the Russian Federation]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Jekonomika* = St Petersburg University Journal of Economic Studies. 2024. 40. 3: 387—415. (In Russ.). DOI: 10.21638/spbu05.2024.303. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73239484>
49. Fomenko G.A., Romanovskaya A.A., Fomenko M.A. (et al.). *Lesnye klimaticheskie proekty: vozmozhnosti i problemy realizacii ESG-podhoda. Chast' 1* [Forest Carbon Projects: Opportunities and Problems of Implementing the ESG Principles. Part 1]. *Problemy regional'noj jekologii* = Problems of Regional Ecology. 2022. 2: 91—106. (In Russ.). DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48728483>
50. Fomenko G.A., Romanovskaya A.A., Fomenko M.A. (et al.). *Lesnye klimaticheskie proekty: vozmozhnosti i problemy realizacii ESG-podhoda. Chast' 2* [Forest Carbon Projects: Opportunities and Problems of Implementing the ESG Principles. Part 2] *Problemy regional'noj jekologii* = Problems of Regional Ecology. 2022. 3: 65—74. (In Russ.). DOI: 10.24412/1728-323X-2022-3-65-74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49327696>
51. Li J.F., Wang X., Zhang Y.X. *Is it in China's interest to implement an export carbon tax?* *Energy Economics*. 2012. 34. 6: 2072—2080. DOI: 10.1016/j.eneco.2012.02.012
52. Lenglet J., Courtonne J.-Y., Cauria S. *Material flow analysis of the forest-wood supply chain: A consequential approach for log export policies in France*. *Journal of Cleaner Production*. 2017. 165: 1296—1305. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.177
53. Sasaki N. *Timber production and carbon emission reductions through improved forest management and substitution of fossil fuels with wood biomass*. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. 173: 105737. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105737

Сведения об авторах

✉ Гордеев Роман Викторович — канд. экон. наук, старший научный сотрудник Отдела прогнозирования экономического развития Красноярского края Института экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академика Лаврентьева, 17, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630090, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>, e-mail: rgordeev@sfu-kras.ru.

Пыжжев Антон Игоревич, канд. экон. наук, заместитель директора по научной работе, заведующий Отделом прогнозирования экономического развития Красноярского края Института экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академика Лаврентьева, 17, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630090, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>, e-mail: apyzhev@sfu-kras.ru.

Information about the authors

✉ *Roman V. Gordeev* – PhD in Economics, Senior Researcher, Department of Economic Development Forecasting of Krasnoyarsk Krai, Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 17 Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk 630090, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2769-3914>, e-mail: rumgord@ya.ru.

Anton I. Pyzhev – PhD in Economics, Deputy director on scientific research, Head of the Department of Economic Development Forecasting of Krasnoyarsk Krai, Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 17 Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk 630090, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7909-3227>, e-mail: pyanist@ya.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Научное обоснование показателей, характеризующих достижение целей адаптации к изменениям климата в лесах субъектов Российской Федерации

Артём В. Константинов✉, konstantinov_a82@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1864-9313>

Татьяна В. Якушева, ytvles@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7635-7327>

Светлана А. Выродова, svyrodova@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6106-3967>

ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., 21, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

В условиях антропогенного изменения климата, которое проявляется в устойчивом росте среднегодовых температур, трансформации режима осадков и учащении экстремальных погодных явлений, лесные экосистемы России сталкиваются с растущим давлением. Данное исследование нацелено на разработку комплексного научно-методического подхода для оценки уязвимости и адаптационного потенциала лесов, а также для количественного определения эффективности реализуемых адаптационных мер. Методологической основой работы выступил системный анализ, включивший изучение современной нормативно-правовой базы лесоклиматической политики, контент-анализ документов стратегического и оперативного планирования, статистический анализ данных государственного лесного реестра и отраслевой отчетности, а также обобщение научных исследований о воздействии климатических факторов на леса.

В результате проведенного исследования были систематизированы ключевые климатические риски для лесного хозяйства России, обусловленные региональными природно-экологическими особенностями. Была разработана иерархическая система индикаторов для мониторинга и оценки эффективности адаптационных мероприятий. Эта система объединяет интегральный показатель, отражающий общую динамику лесного покрова, и набор частных метрик, количественно характеризующих динамику отдельных компонентов риска, таких как продуктивность, породная структура, пирологическая опасность, фитопатологическая угроза и последствия экстремальных погодных явлений. Для каждого показателя идентифицированы однозначные источники первичных данных в формах государственной отчетности, что обеспечивает методологическое единство, верифицируемость и сопоставимость результатов на всех уровнях управления. Обоснована необходимость применения предложенной системы для перехода от качественных оценок к количественному анализу затрат, результатов и общей эффективности адаптационной политики в лесном секторе. Внедрение разработанного подхода в практику лесного планирования и мониторинга позволит повысить обоснованность управленческих решений, объективизировать отраслевую отчетность и оптимизировать ресурсное обеспечение мероприятий, направленных на повышение устойчивости и сохранение экосистемных функций лесов в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: меры адаптации лесов, климатическая политика, лесные экосистемы, лесное планирование, лесной сектор экономики, лесоуправление, показатели достижения целей адаптации, углеродный цикл

Финансирование: работа выполнена в рамках выполнения государственного задания на проведение прикладных научных исследований от 26.12.2024 № 053-00005-25-00 «Разработка системы планирования, реализации и оценки эффективности мер государственной климатической политики в лесном секторе Российской Федерации» (первый этап).

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Константинов, А. В. Научное обоснование показателей, характеризующих достижение целей адаптации к изменениям климата в лесах субъектов Российской Федерации / А. В. Константинов, Т. В. Якушева, С. А. Выродова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 148–165. – Библиогр.: с. 160–164 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/10>


Поступила 01.08.2025. Пересмотрена 30.08.2025. Принята 15.09.2025. Опубликовано онлайн 25.09.2025.

Article

Scientific substantiation of indicators characterizing the achievement of adaptation goals to climate change in forests of the constituent entities of the Russian Federation

Artem V. Konstantinov ✉, konstantinov_a82@mail.ru,  <http://orcid.org/0000-0002-1864-9313>

Tatyana V. Yakusheva, ytyles@mail.ru,  <http://orcid.org/0000-0002-7635-7327>

Svetlana A. Vyrodova, svyrodova@mail.ru,  <http://orcid.org/0000-0002-6106-3967>

Saint-Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky prospect, 21, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

Abstract

In the context of anthropogenic climate change characterized by a sustained increase in average annual temperatures, transformation of precipitation patterns and more frequent extreme weather events, forest ecosystems in Russia are facing increasing pressure. This study aims to develop an integrated scientific-methodological approach for assessing vulnerability and adaptive capacity of forests as well as quantitatively determining the effectiveness of implemented adaptation measures.

The methodological basis of this work included systems analysis encompassing examination of current legal regulations on forestry-climate policy, content analysis of strategic and operational planning documents, statistical analysis of data from the state forest register and industry reports, along with synthesis of scientific research on the impact of climatic factors on forests.

As a result of the conducted research, key climate risks for Russian forestry were systematized based on regional natural-ecological characteristics. A hierarchical indicator system was developed for monitoring and evaluating the effectiveness of adaptation measures. This system integrates an integral index reflecting overall dynamics of forest cover and a set of specific metrics that quantitatively characterize changes in individual risk components such as productivity, species composition, fire hazard, phytosanitary threats, and consequences of extreme weather phenomena.

For each indicator, clear sources of primary data have been identified within official reporting forms, ensuring methodological consistency, verifiability, and comparability of results at all levels of management. The necessity of applying this proposed system is justified for transitioning from qualitative assessments to quantitative cost-benefit analyses and evaluation of overall effectiveness of adaptation policies in the forestry sector.

Implementation of the developed approach into practical forest planning and monitoring will enhance evidence-based decision-making, objectify industry reporting, and optimize resource allocation for activities aimed at enhancing resilience and preserving ecosystem functions of forests under changing climatic conditions.

Keywords: *forest adaptation measures, climate policy, forest ecosystems, forest planning, forest sector of the economy, forest management, indicators for achieving adaptation goals, carbon cycle*

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment for applied scientific research dated 26.12.2024 No. 053-00005-25-00 «Development of a system for planning, implementing and assessing the effectiveness of state climate policy measures in the forest sector of the Russian Federation» (first stage).

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

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

For citation: Konstantinov A. V, Yakusheva T. V., Vyrodova S. A. (2025) Scientific substantiation of indicators characterizing the achievement of adaptation goals to climate change in forests of the constituent entities of the Russian Federation. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 148-165 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/10>

Received 01.08.2025. Revised 30.08.2025. Accepted 15.09.2025. Published online 25.09.2025.

Введение

Текущие климатические изменения на территории России, в том числе повышение температуры, неравномерное увеличение количества осадков и модификации ряда других параметров, все более усиливают воздействие на леса, что, в свою очередь, провоцирует изменение границ распространения ареалов, как лесонасаждений, так и отдельных видов.

Лесные экосистемы различаются, на фоне региональных природно-экологических особенностей, по степени их уязвимости к неблагоприятным последствиям внешних воздействий. Адаптационные меры должны обеспечиваться в долгосрочной перспективе с учетом региональных особенностей [1].

В адаптационной стратегии необходимо учитывать произошедшие и прогнозируемые изменения климата с целью научного обоснования системы устойчивого управления лесными ресурсами, планирования, реализации и контроля за осуществлением мер по адаптации лесного комплекса к климатическим изменениям на разных уровнях государственного управления.

С 2023 года совершенствовалось законодательство Российской Федерации, направленное на нормативное правовое обеспечение климатической политики нашей страны. Знаковым событием надо считать принятие ряда законодательных актов, регламентирующих, в том числе, климатическую политику в лесном хозяйстве, прежде всего, в части главы 4.1 «Климаторегулирующий потенциал лесов» Лесного кодекса РФ [2].

В России формируются необходимые условия для реализации лесоклиматических проектов, в частности, разработаны и утверждены критерии отнесения проектов к климатическим; порядок представления отчетов по их реализации; правила верификации их результатов. Создан и начал работать реестр углеродных единиц, в котором производится регистрация климатических проектов и выпуск в обращение углеродных единиц по результатам реализации таких проектов [3].

В частности, лесоклиматические проекты включают облесение, лесовосстановление; лесоразведение, в том числе создание противоэрозионных насаждений; улучшенное лесопользование и предотвращение конверсии, т.е. перевода лесных земель в нелесные, др.

Климатической доктриной Российской Федерации [4] определены основные цели, задачи, принципы, содержание и пути реализации единой государственной политики страны в области изменений климата. Разработаны и утверждены «Методические рекомендации и показатели адаптации отдельных объектов к изменениям климата» [5]. Разработка мероприятий по сохранению экологического потенциала лесов, адаптации и повышению устойчивости лесов предусмотрена и типовой формой лесного плана субъекта РФ [6]. При этом на текущий момент не представлен достаточно понятный и прозрачный механизм контроля над реализацией запланированных мероприятий, а соответственно, не представляется возможным объективно оценить экономическую составляющую лесного планирования как с точки зрения затрат на осуществление комплекса мероприятий климатической значимости, так

и получаемый эффект на плановый десятилетний период.

С целью обоснования данных показателей в отношении каждого климатического риска использовались подходы, базирующиеся на доступности расчетных данных, включая формы государственного лесного реестра (ГЛР) [7], отчетности об осуществлении органами государственной власти субъектов РФ переданных полномочий в области лесных отношений (ОИП) [8] и метеорологические данные, представленные в научно-прикладном справочнике «Климат России» [9].

Второй подход учитывает важность результатов многолетних исследований в области роста и развития лесных насаждений в различных природных условиях; опыт разработки методик оценки уязвимости лесов к нарушающим воздействиям различного характера; оценку уровня адаптации лесов к климатическим изменениям, выполненные, в том числе, учеными ФБУ «СПбНИИЛХ» [10].

Материалы и методы

Объектами исследований являются лесные экосистемы, подвергающиеся различным внешним воздействиям природного и антропогенного характера в условиях глобальных климатических изменений; лесохозяйственные мероприятия, способствующие предотвращению деградации лесов; системы мониторинга в формате показателей, характеризующих достижение целей адаптации лесных экосистем к изменениям климата.

Источники информации:

- документы лесного планирования субъектов РФ;
- законодательные и нормативные правовые акты в области лесных отношений РФ;
- формы отраслевой статистической отчетности;
- материалы государственного лесного реестра;
- документы стратегического развития лесного сектора экономики России;
- научные материалы по оценке обоснованности разных стратегий лесопользования и лесопользования климатической направленности, включая

сведения о влиянии основных видов лесохозяйственных мероприятий на цикл углерода в управляемых лесах.

При сборе и анализе исследуемых материалов применялись типовые методологические подходы: лесоводственные, лесотаксационные, геоэкологические, метеорологические, статистические.

Используемые при проведении исследований методы – теоретические (контент-анализ нормативной и методологической базы); изучение, обобщение и теоретическое осмысление имеющегося опыта в части направления научных изысканий.

Результаты

Рассматривая влияние климатических изменений на лесные экосистемы, важно понимать, что данные факторы действуют как в масштабе насаждения, так и в масштабе ландшафта [11]. Изменение климата может существенно повлиять на различные процессы, например, межвидовую конкуренцию, ход сукцессий, затрагивая при этом физиологию и фенологию отдельных видов древесной растительности, напрямую воздействуя на их способность роста и восстановления.

Реакция лесных сообществ на изменения климата влияет, в свою очередь, на конкурентные сильные и слабые стороны видов, что приводит к корректировкам в структуре лесных сообществ [12].

Одновременно может увеличиваться активность лесных пожаров [13] или вспышек насекомых-вредителей [14]. Нарушения природного характера могут провоцировать распространение новых видов и смещать возрастную структуру лесов в сторону более молодых классов возраста [15].

В настоящее время важен взвешенный подход к подготовке отдельного перечня мероприятий по адаптации лесов к изменению климата, что, в свою очередь, позволит, выявить приоритетные меры противодействия климатическим рискам, изыскать необходимые ресурсы для их осуществления с учетом текущего состояния и прогнозных показателей на десятилетний период планирования.

Климатический эффект восстановления лесов имеет комплексный характер: как средство адаптации к изменению климата и как средство по погло-

щению и долгосрочному хранению углерода. Создаваемые лесные насаждения будут накапливать углерод в пулах фитомассы, мертвой древесины, подстилки и почвы [16].

В свете вышеизложенного необходимо научное обоснование показателей адаптации лесов к изменениям климата, так их функции углеродных резервуаров напрямую зависят от климатических факторов: потепления, изменение количества осадков, смены породного состава (после сплошных рубок и пожаров), экстремальных природных явлений.

Возможность смягчить последствия климатических изменений путем снижения выбросов углекислого газа, вызванных в том числе, обезлесением и деградацией лесов, а также перспектива увеличения поглощения углерода с помощью воспроизводства лесов и устойчивого лесопользования играют важную роль в экологическом балансе.

Общими принципами по нивелированию климатических изменений и адаптации к ним лесной отрасли могут стать:

- использование имеющихся данных уязвимости и адаптации лесных экосистем к текущим изменениям климата;
- необходимость взаимодействия заинтересованных участников лесных отношений;
- межотраслевой подход, нацеленный на достижение запланированных целей по снижению климатических рисков;
- нацеленность на максимальное сохранение лесистости регионов, сохранение экологического потенциала лесов;
- применение экологических природосберегающих технологий, прежде всего отечественных, в отраслевых производственных процессах;
- интенсификация лесопользования и воспроизводства лесов;
- повышение эффективности комплекса лесохозяйственных мероприятий;
- обмен и накопление знаний о последствиях изменения климата с учетом экономической и геополитической ситуации в стране и мире;
- рациональное лесное планирование на основе современных методик оценки углеродной составляющей, объемов накопления парниковых газов

и мер адаптации лесных экосистем к изменениям климата на основе актуальной информации о лесах.

При планировании адаптационных мероприятий в каждом лесном плане необходимо осуществление предварительной ретроспективной оценки, позволяющей выделить наиболее характерные для конкретных условий климатические риски и предусмотреть необходимые финансовые и иные средства их компенсации.

Сценарии адаптации должны выстраиваться методом подбора необходимых лесохозяйственных мероприятий и их комбинаций с учетом принципов ведения устойчивого лесного хозяйства, лесного районирования и особенностей лесных экосистем каждого субъекта РФ.

С точки зрения углеродного цикла для поддержания существующего баланса в долгосрочной временной перспективе нельзя допускать снижения производительности лесов и сокращения лесопокрываемых площадей, то есть основным интегральным показателем, характеризующим одновременно уровень уязвимости и адаптации к изменениям климата, может выступать показатель лесистости, выражаемый как отношение покрытой лесом площади к общей площади.

Сведения по планируемому и фактически реализованным объемам лесохозяйственных мероприятий и текущему состоянию лесного фонда сосредоточены в соответствующих формах отчетности государственного лесного реестра (ГЛР); материалах государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) [17]; формах отраслевой статистической отчетности субъектов Российской Федерации об исполнении полномочий (ОИП).

Разработка мероприятий по сохранению экологического потенциала лесов, адаптации и повышению устойчивости лесов предусмотрена типовой формой лесного плана субъекта РФ в части разделов: 1.2 «Природно-климатические особенности, в том числе изменение основных климатических показателей»; 4.2 «Информация о планируемых мероприятиях по сохранению экологического потенциала лесов, адаптации к изменениям климата и повышению устойчивости лесов»; «Планируемые мероприятия по сохранению экологического потенциала

лесов, адаптации к изменениям климата и повышению устойчивости лесов» указываются по форме, содержащейся в приложении 21 к настоящей Типовой форме лесного плана субъекта Российской Федерации».

Но для многих субъектов разработка данных разделов представляет определенные сложности в связи с отсутствием единых подходов к разработке; унифицированных и уточняющих показателей представления плановой и отчетной информации.

С целью решения данной проблемы в основу принципов мониторинга и оценки эффективности мероприятий нивелирования климатических изменений и адаптации к ним лесов могут быть положены, в частности, использование расчетных данных в качестве индикаторов уязвимости и адаптации лесных экосистем к изменениям климата; взаимодействие всех заинтересованных сторон, прежде всего, органов исполнительной власти в области лесных отношений субъектов РФ, лесопользователей, экологических организаций, общественности с целью совершенствования критериев оценки, расчета показателей.

В лесных планах субъектов РФ выделяются пять ключевых климатических рисков, характерных для лесного хозяйства, отображающих основные последствия изменений климата, к которым относятся:

- изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков;
- изменения в видовом (породном) составе лесов;
- увеличение частоты возникновения пожаров в лесах и площадей, пройденных лесными пожарами;
- увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах;
- увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах.

Несмотря на важность осуществления запланированных мероприятий климатической направленности на уровне каждого субъекта РФ и передаче достигнутых результатов в формате отраслевой отчетности на федеральный уровень, наблюдаются значительные расхождения как в анализе и оценке

полученных данных, так и форме их представления. В связи с чем важна проработка механизма ухода от дублирования отнесения одного и того же мероприятия к предотвращению различных рисков, так как подобный подход может повлечь искаженное представление об объемах и стоимости проводимых адаптационных работ, негативно отразиться на результатах эффективности адаптации лесов в разрезе субъектов РФ.

Надо признать, что в ряде случаев довольно сложно отнести то или иное мероприятие к одному конкретному риску, в связи с чем, предлагается планировать адаптационные лесохозяйственные мероприятия таким образом, чтобы минимизировать их дублирование в последующей отчетности. Целесообразно оценивать объемы и стоимость осуществления каждого из таких мероприятий, а далее относить к одному приоритетному риску во избежание ошибок при обобщении материалов отчетности и учете финансовых затрат.

Предлагаемые показатели направлены на анализ предрасположенности лесных экосистем к неблагоприятным климатическим воздействиям и отображение процессов их адаптации при выполнении плановых мероприятий на региональном уровне.

Интегральным показателем, характеризующим уровень уязвимости и адаптации к изменениям климата в лесном хозяйстве, может выступать показатель лесистости территории, определяющийся отношением покрытой лесом площади к общей площади респондента и выражающийся в процентах. Лесистость является результирующей величиной совместного воздействия природно-климатических и антропогенных факторов, а также характеризует успешность вмешательства человека, направленного на корректировку лесных экосистем под ожидаемое изменение климата и его воздействие.

Сравнительный анализ установленного индикативного значения лесистости с фактическим позволит с достаточной степенью полноты оценивать достижение целей адаптации к изменениям климата объектов воздействия факторов климата на отраслевом и региональном уровнях.

Для обобщения данных и оценки деятельности каждого региона следует установить единую классификацию единиц измерений. В течение планового периода по годам предлагается использовать унифицированные обозначения, поскольку их распространенность негативно сказывается на общей картине анализируемой информации и отраслевой отчетности в целом.

В приоритетном порядке для определения уровня адаптации лесов целесообразно ежегодно учитывать текущее изменение основного индикативного показателя климатического риска – лесистости, зависящего от погодных и лесорастительных условий каждого субъекта РФ, качества проведения лесохозяйственных мероприятий и использования лесов.

В связи с необходимостью оценки достижения целей адаптации к изменениям климата, предлагается целесообразным установление следующих дополнительных показателей, согласованных со структурой климатических рисков в лесном комплексе нашей страны, которая определена в приложении 21 к типовой форме лесного плана субъекта РФ. Предлагаемые уточняющие показатели направлены на анализ предрасположенности лесных экосистем к неблагоприятным климатическим воздействиям и отображение процессов адаптации при выполнении лесохозяйственных мероприятий:

- изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков: изменение общего среднего прироста на гектар по отношению к базовому периоду, тыс. м³/га;

- изменения в видовом (породном) составе лесов: изменение площади хвойных пород по сравнению с базовым периодом, % и изменение площади твердолиственных пород по сравнению с базовым периодом, %;

- увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами: отношение числа лесных пожаров к площади лесных земель, шт./тыс. га и отношение площади погибших лесных насаждений к площади лесных земель, %;

- увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах: относительная площадь очагов вредных организмов, % и изменение отношения площади погибших лесных насаждений от повреждения вредителями и болезнями леса к площади лесных земель, %;

- увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах: изменение относительной гибели лесов от погодных условий и почвенно-климатических факторов по сравнению с базовым периодом, %.

Под продуктивностью лесов понимается, прежде всего, количество ресурсов, произведенных лесом за определенный временной промежуток на единице площади, а также выполняемые за соответствующий период экологические функции. Основным показателем продуктивности считается класс бонитета, представляющий собой таксационную характеристику древостоев, определяющую потенциальный запас (м³ или тыс. м³), скорость роста (по высоте (м) и диаметру, (см)), накопление биомассы.

Изменение продуктивности лесов напрямую сказывается на запасе лесных насаждений на единицу площади, определяемом по динамике общего среднего прироста на 1 га, который отражает качество условий местопроизрастания каждого биоценоза. При этом лесохозяйственные мероприятия, направленные на улучшение природной среды, могут оказать на него положительное влияние, демонстрируя эффективность применяемых мер не только ресурсной, но и климатической направленности. Снижение среднего прироста свидетельствует, соответственно, об ухудшении качества древостоев. В частности, увеличение прироста лесонасаждений путем внесения удобрений для молодняков и лесных культур, при сравнительном анализе с базовым вариантом (без внешнего вмешательства) может варьироваться в пределах 1,5-2,0 м³/га в год за десятилетие [18]. Сопоставление изменений в динамике прироста с экологическими условиями (температурой воздуха, влагонасыщенностью, нарушающими факторами природного характера) позволяет выявить основные факторы, влияющие на состояние лесных растений и принять меры, способствующие их росту и развитию.

Географическое распределение древесных пород зависит от климатических условий, в частности, от минимальной температуры воздуха и обеспеченности влагой в теплый сезон. Индикативным показателем риска изменения в видовом (породном) составе лесонасаждений выступает вероятное сокращение площадей, покрытых основными лесобразующими породами, прежде всего, твердолиственными и хвойными, как наиболее востребованными промышленностью, при одновременном увеличении площади мягколиственных пород. В данном контексте к нарушающим воздействиям относятся массовые вырубki; перевод лесных земель в земли иных категорий (непокрытые лесом); атмосферное загрязнение, замедляющее и угнетающее растительность; лесные пожары, экстремальные погодные периоды, приводящие к изменениям границ ареалов отдельных древесных пород.

В частности, ущерб хвойным породам может причинить весенняя засуха при малой толщине снежного покрова, так как при не полностью оттаявших почвах влага оказывается малодоступной, а повышение температуры воздуха провоцирует активное испарение и ослабление жизненных процессов растущих деревьев, как и ураганные ветры, заболачивание мест произрастания. Постепенное повышение средней температуры воздуха наряду с ослаблением лесонасаждений провоцирует также вспышки массового размножения насекомых-вредителей и возникновение очагов лесных пожаров, что оказывает крайне негативное воздействие на хвойные древостой.

К основным природным причинам уменьшения площадей, занятых твердолиственными породами, можно отнести экстремально низкие температуры зимой, длительные подтопления в весенний период, уменьшение или нарушение плодородного слоя почв.

Важно отметить, что смешанные насаждения более устойчивы к неблагоприятным факторам внешней среды – насекомым-вредителям, ветровалам (чистые ельники), возгораниям (ельники и сосняки). Содействуя образованию насаждений, наиболее устойчивых к тем или иным нарушающим факторам, можно добиться максимального сохранения

лесопокрытых площадей, а соответственно, говорить об ускорении адаптации лесных экосистем.

Мониторинг динамики видового состава лесов и принимаемые на его базе решения способствуют сохранению и поддержанию биоразнообразия существующих природных экосистем, их устойчивости к неблагоприятным внешним воздействиям, выбору наиболее эффективных мер лесовосстановления с учетом горизонта лесного планирования, что направлено на решение как ресурсных, так и климатических задач.

Увеличение частоты возникновения лесных пожаров и площадей, пройденных пожарами, следует считать ключевыми аспектами, приводящими к сокращению покрытых лесом площадей и деградации лесов, появлению значительных обезлесенных территорий, которые часто труднодоступны для лесовосстановления и лесоразведения.

В региональных документах лесного планирования предусматриваются противопожарные мероприятия, направленные на сохранение лесов и минимизацию рисков возгораний. Основные причины лесных пожаров связаны как с деятельностью человека, так и с природными явлениями, к которым относятся молнии, сухие грозы, самовозгорания торфяников, в отдельных регионах вулканическая деятельность, которые за последние десятилетия стали наблюдаться все чаще. Несвоевременная уборка неликвидной древесины и сухостоя на торфяных почвах в засушливый период (при температуре прямого нагрева иногда до 50 °C) может стать катализатором трудно поддающихся тушению торфяных пожаров [19].

Среди лесных пожаров подземные (торфяные) лидируют по объему сгораемого материала на единицу площади и, соответственно, влиянию на изменение климата, однако отличаются сложностью оценки потерь почвенного углерода и поступления его в атмосферу [20].

Осушенные, особенно неиспользуемые заброшенные торфяники наиболее часто подвержены возгораниям и лидируют среди других природных пожаров по величине сгораемого материала [21].

Показатель отношения числа лесных пожаров к площади лесных земель может быть весьма нагляден для оценки климатических рисков. В качестве базового периода, согласно прогнозным климатическим моделям Главной геофизической обсерватории рассматривается период с 1990 по 1999 гг., принятый при расчёте комплексного показателя пожарной опасности Нестерова.

Другие показатели, рассчитываемые на основе материалов отраслевой статистической отчетности форм 10-ОИП и 1-ГЛР, призваны отражать воздействия лесных пожаров на единицу площади лесных земель, что, в свою очередь, позволяет конкретизировать данные и избежать искажений при оценке и сопоставлении сведений разных субъектов РФ. Для объективности целесообразно сравнивать равнозначные по длительности периоды климатических рисков [22].

Помимо статистической информации о количестве очагов возгораний для каждого субъекта РФ, важно учитывать ежегодные изменения средней температуры воздуха и количества осадков в летний период, поскольку они важны при планировании и предварительной подготовке необходимых объемов сил и средств пожаротушения, особенно на не переданных в пользование территориях. Для лесных участков, находящихся в аренде для разных видов использования, сведения о необходимых противопожарных мероприятиях приводятся в проектах освоения лесов, а их исполнение контролируется органами исполнительной власти субъектов РФ.

Показатель отношения площади погибших лесных насаждений к площади лесных земель призван отражать динамику изменений лесопокрываемых площадей на уровне субъектов РФ с целью недопущения их сокращения с учетом наиболее прогнозируемых причин и принятия мер превентивного характера, что, в свою очередь, направлено на поддержание лесистости территорий.

К существенным факторам, влияющим на качественные и количественные характеристики древостоев, следует отнести увеличения частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах, включая относительную площадь выявленных очагов вредных организмов, угрожающих жизнеспособности растений, и изменение отношения

площади погибших от энтомофитовредителей лесных насаждений к площади лесных земель.

Научное обоснование показателя относительной площади очагов вредных организмов в лесах продиктовано необходимостью прогнозирования вероятной угрозы древостоям (особенно ценных хвойных и твердолиственных пород), а также с целью рационального планирования мероприятий по защите насаждений от вредителей и болезней, в том числе, биотехнических.

Для классификации территории по степени угрозы массовых размножений насекомых используются такие критерии, как изменения границ ареалов обитания вредителей, характерных для различных природных условий; частота (повторяемость) вспышек; встречаемость и вероятность образования очагов; интенсивность массовых размножений в зависимости от метеорологических условий.

Повышение температуры, влажности воздуха и почв способствуют выживаемости, плодовитости, расширению ареалов насекомых-вредителей, в результате деятельности которых уменьшается прирост и плодоношение растений, снижается продуктивность насаждений, а, следовательно, накопление биомассы. Изменение отношения площади погибших лесных насаждений от повреждения вредителями и болезнями леса к площади лесных земель создает возможность оценки динамики санитарного состояния древостоев на конкретных лесных участках.

Показатель «увеличения частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах: изменение относительной гибели лесов от погодных условий и почвенно-климатических факторов по сравнению с базовым периодом» приобретает все большее значение в условиях глобальных климатических изменений. Состояние лесных экосистем во многом определяется региональными тенденциями изменения среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков.

Повышение средних температур, влияние аномальных осадков или длительных засушливых периодов способно привести как напрямую к катастрофическим последствиям (смерчи, сели, наводнения, засухи и т. д.), так и отобразить косвенный эффект в виде ослабления и деградации древостоев,

повышения рисков ветровалов и буреломов, вспышек насекомых, возгораний природного характера.

В неблагоприятных условиях уменьшается прирост древесины, прослеживаемый по изменению структуры и ширины годичных колец; скорости роста; фиксируется частичное усыхание хвои или листвы. Трансформация лесных экосистем может выражаться в сокращении покрытых лесной растительностью площадей, фрагментации лесных массивов, изменении возрастной структуры и породного состава.

Наличие плодородного слоя почв и степень его влажности формируют видовой состав и морфологическую структуру древостоев, обеспечивают наращивание биомассы. Препятствовать негативным воздействиям на сложившиеся природные объекты можно при условии сохранения типичных почвенно-грунтовых горизонтов, агромелиорации, рекультивации нарушенных земель, минимизации антропогенного промышленного влияния на окружающую среду.

Соответствующие мероприятия, намеченные в документах лесного планирования, позволят предотвратить обезлесение территорий, сохранить коренные ареалы ценных лесобразующих пород.

На повышение устойчивости лесов к глобальным изменениям климата могут быть направлены следующие меры с учетом особенностей региональных биоценозов:

- для ряда южных регионов, гористой местности создание насаждений из засухоустойчивых культур, противоэрозионных защитных полос;
- для наиболее подверженных пожарам – создание смешанных насаждений и лесных культур с включением лиственных пород;
- агротехнический и лесоводственный уход за лесными культурами, активное содействие естественному лесовозобновлению;

- соблюдение правил отвода лесосек с учётом направления преобладающих ветров, преимущественное применение выборочных рубок;

- своевременная рекультивация нарушенных лесных земель, компенсационное лесовосстановление;

- эффективное выполнение противопожарных и лесозащитных мероприятий, согласно документам лесного планирования и проектирования;

- сохранение коренных лесов;

- активная экологическая пропаганда в регионах среди населения;

- государственная политика и финансовая поддержка, способствующая устойчивому лесопользованию.

Для рационального планирования и объективной оценки результатов выполнения мероприятий климатического значения важен анализ таких ретроспективных показателей, как снижение среднего прироста на 1 га; изменения в структуре и породном составе лесов, статистика частоты возникновения лесных пожаров и очагов вредителей; прогнозные показатели погоды (сумма активных температур, гидротермический коэффициент и др.) [23].

Практическое осуществление лесохозяйственных мероприятий предусматривается в соответствии с действующим отраслевым законодательством, документами лесного планирования, проектирования и охраны окружающей среды; лесорастительными условиями и естественной динамикой лесного фонда, социальными особенностями субъектов РФ.

Перечень показателей, характеризующих достижение целей адаптации к изменениям климата (в рассматриваемом случае – лесных экосистем в качестве объектов воздействия факторов климата) на отраслевом и региональном уровнях, а также источники исходных данных для их расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Перечень показателей, характеризующих достижение целей адаптации к изменениям климата объектов воздействия факторов климата на отраслевом и региональном уровнях

Table 1

List of indicators characterizing the achievement of climate change adaptation goals objects of climate factors impact at the sectoral and regional levels

1. Интегральный показатель, характеризующий достижение целей адаптации к изменениям климата объектов воздействия факторов климата на отраслевом и региональном уровнях An integrated indicator characterizing the achievement of adaptation goals to climate change of objects affected by climate factors at the industry and regional levels	
Название показателя Name of the indicator	Источник данных Data source
1	2
Отношение покрытой лесом площади к общей площади объекта воздействия факторов климата (лесистость), % Ratio of forested area to total area of the object of influence of climate factors (forest cover), %	Столбец 14 «Лесистость территории, %» формы № 3-ГЛР Column 14 «Forest cover of the territory, %» of form No. 3-GLR I
2. Дополнительные показатели, характеризующие достижение целей адаптации к изменениям климата объектов воздействия факторов климата на отраслевом и региональном уровнях Additional indicators characterizing the achievement of the goals of adaptation to climate change of objects of influence of climate factors at the sectoral and regional levels	
Изменение общего среднего прироста на гектар по отношению к базовому периоду, тыс. м³/га Change in the total average growth per hectare in relation to the base period, thousand m³/ha	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» и столбец 18 «Общий средний прирост» формы 2-ГЛР Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered by forest vegetation), total» and column 18 «Total average growth» of form 2-GLR
Изменение площади хвойных пород по сравнению с базовым периодом, % Change in the area of coniferous species compared to the base period, %	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» формы 2-ГЛР и столбец 6 «Площади лесных насаждений по группам пород и классам бонитета, хвойные, итого» формы 5-ГЛР Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered with forest vegetation), total» of form 2-GLR and column 6 «Area of forest plantations by species groups and quality classes, coniferous, total» of form 5-GLR
Изменение площади твердолиственных пород по сравнению с базовым периодом, % Change in the area of hardwoods compared to the base period, %	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» формы 2-ГЛР и столбец 12 «Площади лесных насаждений по группам пород и классам бонитета, твердолиственные, итого» формы 5-ГЛР Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered with forest vegetation), total» of form 2-GLR and column 12 «Area of forest plantations by species groups and quality classes, hardwood, total» of form 5-GLR
Отношение числа лесных пожаров к площади лесных земель, шт./тыс. га Ratio of the number of forest fires to the area of forest land, pcs/thousand ha	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» формы 2-ГЛР, столбец 7 «Итого, число случаев» раздела 1 «Сведения о возникновении лесных пожаров и их тушении с учетом целевого использования лесов» формы 7-ОИП Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered with forest vegetation), total» of form 2-GLR, column 7 «Total, number of cases» of section 1 «Information on the occurrence of forest fires and their extinguishing, taking into account the intended use of forests» of form 7-OIP
Отношение площади погибших лесных насаждений к площади лесных земель, %	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» формы 2-ГЛР, столбец 13 «Лесные пожары,

1. Интегральный показатель, характеризующий достижение целей адаптации к изменениям климата объектов воздействия факторов климата на отраслевом и региональном уровнях An integrated indicator characterizing the achievement of adaptation goals to climate change of objects affected by climate factors at the industry and regional levels	
Название показателя Name of the indicator	Источник данных Data source
1	2
Ratio of the area of dead forest stands to the area of forest lands, %	площадь погибших лесных насаждений, выявлено с начала года, всего» раздела 2 «Сведения о повреждении и гибели лесов с усыханием более 10 %» формы 10-ОИП Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered with forest vegetation), total» of form 2-GLR, column 13 «Forest fires, area of lost forest plantations, identified since the beginning of the year, total» of section 2 «Information on damage and loss of forests with drying out of more than 10 %» of form 10-OIP
Относительная площадь очагов вредных организмов, % Relative area of pest outbreaks	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» формы 2-ГЛР, столбец 7 «Площадь очагов вредных организмов, на конец отчётного периода, всего» раздела 1 «Сведения об очагах вредителей и болезней леса» формы 10-ОИП Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered with forest vegetation), total» of form 2-GLR, column 7 «Area of outbreaks of harmful organisms, at the end of the reporting period, total» of section 1 «Information on outbreaks of forest pests and diseases» of form 10-OIP
Изменение отношения площади погибших лесных насаждений от повреждения вредителями и болезнями леса к площади лесных земель, % Change in the ratio of the area of forest stands lost due to damage by pests and forest diseases to the area of forest lands, %	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» формы 2-ГЛР, столбец 28 «Повреждения насекомыми, площадь погибших лесных насаждений, в том числе погибло с начала года » и столбец 46 «Болезни леса, площадь погибших лесных насаждений, в том числе погибло с начала года » раздела 2 «Сведения о повреждении и гибели лесов с усыханием более 10 %» формы 10-ОИП Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered with forest vegetation), total» of form 2-GLR, column 28 «Insect damage, area of dead forest plantations, including died since the beginning of the year» and column 46 «Forest diseases, area of dead forest plantations, including died since the beginning of the year» of section 2 «Information on damage and death of forests with drying out more than 10 %» of form 10-OIP
Изменение относительной гибели лесов от погодных условий и почвенно-климатических факторов по сравнению с базовым периодом, % Change in relative forest loss due to weather conditions and soil and climate factors compared to the base period, %	Столбец 3 «Площадь земель, занятых лесными насаждениями (покрытых лесной растительностью), всего» формы 2-ГЛР, столбец 60 «Погодные условия и почвенно-климатические факторы, площадь погибших и поврежденных лесных насаждений, выявлено с начала года, всего» раздела 2 «Сведения о повреждении и гибели лесов с усыханием более 10 %» формы 10-ОИП Column 3 «Area of land occupied by forest plantations (covered with forest vegetation), total» of form 2-GLR, column 60 «Weather conditions and soil and climatic factors, area of dead and damaged forest plantations, identified since the beginning of the year, total» of section 2 «Information on damage and death of forests with drying out of more than 10 %» of form 10-OIP

Источник: собственная разработка авторов

Source: Authors' own development

Для рационального планирования и объективной оценки результатов выполнения мероприятий климатического значения важен анализ таких ретроспективных показателей, как снижение среднего прироста на 1 га; изменения в структуре и породном составе лесов, статистика частоты возникно-

вения лесных пожаров и очагов вредителей; прогнозные погодные показатели (сумма активных температур, гидротермический коэффициент и др.).

Практическое осуществление вышеуказанных мероприятий предусматривается в соответствии с действующим отраслевым законодательством, документами лесного планирования и

охраны окружающей среды; лесорастительными условиями и естественной динамикой лесного фонда, социальными особенностями субъектов РФ.

Задачи поддержания высокого уровня баланса углерода требуют осуществления крупномасштабных дополнительных лесохозяйственных мер. Для большинства регионов наиболее перспективным является усиление охраны лесов от пожаров и вредителей, изменение технологии рубок, модификации подходов к искусственному лесовосстановлению ряд других [24].

Заключение

Проведенное исследование позволяет констатировать, что антропогенно-обусловленные климатические изменения выступают в качестве ключевого стресс-фактора, детерминирующего трансформацию структуры и функций лесных экосистем на территории России. Мультипликативный характер воздействия, проявляющийся в изменении продуктивности и видового состава древостоев, интенсификации пирогенной и фитопатологической угрозы, а также в увеличении частоты aberrаций погодного режима, актуализирует необходимость разработки и имплементации научно обоснованного адаптационного механизма.

Разрешение выявленной проблемы отсутствия унифицированного методического подхода к оценке эффективности адаптационных мероприятий видится во внедрении предложенной системы взаи-

мосвязанных индикаторов. Ее интегральный компонент – показатель лесистости – репрезентирует совокупный результат воздействия природных и антропогенных факторов, отражая динамику общего лесного покрова. Частные показатели, базирующиеся на данных официального статистического учета (ГЛР, ОИП), позволяют проводить детальный мониторинг и анализ в разрезе отдельных климатических рисков, обеспечивая тем самым верификацию отчетных данных и объективизацию процесса принятия управленческих решений.

Таким образом, реализация предложенного методического подхода будет способствовать:

- **Формализации** процесса адаптационного планирования на региональном и отраслевом уровне.
- **Повышению объективности** и сопоставимости данных отраслевого мониторинга.
- **Оптимизации ресурсного обеспечения** мероприятий, направленных на повышение устойчивости и сохранение экологического потенциала лесов.

Последующая работа должна быть сфокусирована на апробации и корректировке предложенной системы показателей для различных лесорастительных условий, а также на разработке на ее основе прогнозных моделей для оценки долгосрочной эффективности адаптационных стратегий в условиях нестационарного климата.

Список литературы

1. Константинов А.В. Сценарный подход к адаптации лесных экосистем Российской Федерации в условиях изменений климата // Известия РАН. Серия Географическая. – 2023. – Т. 87. – № 4. – С. 558-567. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040039>.
2. Лесной кодекс Российской Федерации : федер. закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ // КонсультантПлюс : офиц. сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/.
3. Коротков В.Н. Лесные климатические проекты в России: ограничения и возможности // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2022. – Vol. 7 (4). – С. 1-8. – DOI: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-4-3>.
4. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации : Указ президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 // КонсультантПлюс : офиц. сайт. – URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/82279.html>.
5. Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата (вместе с «Методическими рекомендациями по оценке климатических рисков», «Методическими рекомен-

даниями по ранжированию адаптационных мероприятий по степени их приоритетности», «Методическими рекомендациями по формированию отраслевых, региональных и корпоративных планов адаптации к изменениям климата»): приказ Минэкономразвития России от 13.05.2021 № 267 // КонсультантПлюс : офиц. сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_384470/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdaddd518.

6. Об утверждении типовой формы и состава лесного плана субъекта Российской Федерации, порядка его подготовки и внесения в него изменений : приказ Минприроды России от 20.12.2017 № 692 // КонсультантПлюс : офиц. сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_295497/.

7. Об утверждении Правил ведения государственного лесного реестра : постановление Правительства РФ от 25.08.2023 № 1378 // АО «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302594633>.

8. Об утверждении форм, содержания и порядка представления в форме электронного документа отчетности об осуществлении переданных в соответствии с частью 1 статьи 83 Лесного кодекса Российской Федерации полномочий, а также порядка интеграции соответствующих информационных систем, используемых уполномоченными исполнительными органами субъектов Российской Федерации для учета данных об использовании, охране, о защите, воспроизводстве лесов, с федеральной государственной информационной системой лесного комплекса, иными федеральными информационными системами : приказ Минприроды России от 18.06.2024 № 385 // АО «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306919712>.

9. Научно-прикладной справочник «Климат России» // ВНИИГМИ-МЦД. – 2024. – URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/>.

10. Недбаев И.С., Семенова Е.И., Сорока А.О. Оценка уязвимости лесов к климатическим изменениям // Охрана, инновационное восстановление и устойчивое управление лесами. Forestry-2023 : Материалы Международного лесного форума, 13 октября 2023 г., Воронеж. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. – 2023. – С. 98-114. – DOI: 10.58168/Forestry2023_98-114.

11. Boulanger Y., D.T. Price, Cyr D., Sainte-Marie G. Stand-level drivers most important in determining boreal forest response to climate change. *Journal of Ecology*, 2017; 106 (3): 977-990. – DOI: 10.1111/1365-2745.12892.

12. McDowell N.G., Allen C.D. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change*. 2015; 5: 669-672. – DOI: 10.1038/nclimate2641.

13. Balshi M.S., McGuire D.A., Duffy P., Flannigan M.D., Walsh J., Melillo J. Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a multivariate adaptive regression splines (MARS) approach. *Global Change Biology*. 2008; 15: 578-600. – DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01679.x.

14. Boulanger Y., Arseneault D., Morin H., Jardon Y., Bertrand P., Dagneau C. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana* Clem.) outbreaks in southern Québec for the last 400 years. *Canadian Journal of Forest Research*. 2012; 42: 1264-1276. – DOI: 10.1139/x2012-069.

15. Matthews S.N., Iverson L.R., Prasad A.M., Peters M.P., Rodewald P.G. Modifying climate change habitat models using tree species-specific assessments of model uncertainty and life history-factors. *Forest Ecology and Management*. 2011; 262: 1460-1472. – DOI: 10.1016/j.foreco.2011.06.047.

16. Липка О.Н., Замолотчиков Д.Г., Каганов В.В., Мазманиянц Г.А., Исупова М.В., Алейников А.А. Климатический эффект восстановления лесов в дельте р. Или // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 579-594. – DOI: 10.31857/S2587556621040051.

17. Об утверждении Порядка проведения государственной инвентаризаций лесов : приказ Минприроды России от 27.09.2021 № 686 // АО «Кодекс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/727092651>.

18. Беляева Н.В., Данилов Д.А. Закономерности функционирования сосновых и еловых фитоценозов на объектах рубок ухода и комплексного ухода за лесом // Изд-во Политехнического университета. – 2014. – 164 с.

19. Торфяные пожары. – URL: <https://10.mchs.gov.ru/uploads/resource/2022-03-29/468f5f997304de050f754e5015db0c9e.pdf>.

20. Сири́н А.А., Мака́ров Д.А., Гумме́рт И., Масло́в А.А., Гу́льбе Я.И. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. – 2020. – № 5. – С. 410-422. – DOI: 10.1134/S0024114819050097.
21. Сири́н А.А., Медве́дева М.А., Илья́сов Д.В., Коротко́в В.Н., Мина́ева Т.Ю., Суворов Г.Г. Обводненные торфяники в климатической отчетности Российской Федерации // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 84-101. – DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-84-112.
22. Недбаев И.С., Семенова Е.И., Сорока А.О. Определение пороговых значений показателей риска увеличения количества лесных пожаров в контексте изменения климата // Труды СПбНИИЛХ. – 2024. – С. 234-237. – DOI: 10.21178/160524.234.
23. Сорока А.О., Недбаев И.С., Семенова Е.И. Анализ уровня адаптации лесов в наиболее уязвимых к климатическим изменениям субъектах РФ // Столяровские чтения : Сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 95-летию академика Д.П. Столярова от 5 октября 2023 г. – 2023. – С. 62–66. – DOI: 10.21178/05102023.62.
24. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В. Современное сокращение стока углерода в леса России // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 476. – № 6. – С. 219-721. – DOI: 10.7868/S0869565217300259.
25. Niu P., Jiang Y., Yang Y., Wang L. The characteristics and influencing factors of change in farmland system vulnerability: A case study of Sanmenxia City, China. *Front. Environ. Sci.* 10:887570. 2022; 10: 1-19. – DOI: 10.3389/fenvs.2022.887570.

References

1. Konstantinov A.V. *Stsenarnyi podkhod k adaptatsii lesnykh ekosistem Rossiiskoi Federatsii v uslo-viyakh izmenenii klimata*. [Scenario approach to adaptation of forest ecosystems of the Russian Federation in the context of climate change]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2023; 87(4): 558-567. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040039>.
2. *Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federatsii : feder. zakon ot 04.12.2006 No. 200-FZ*. [Forest Code of the Russian Federation: federal law of 04.12.2006 No. 200-FZ]. *Konsul'tantPlyus: ofits. sait*. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/.
3. Korotkov V.N. *Lesnye klimaticheskie proekty v Rossii: ogranicheniya i vozmozhnosti* // *Russian Journal of Ecosystem Ecology* [Forest climate projects in Russia: limitations and possibilities]. 2022; 7(4): 1-8. – DOI: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-4-3>.
4. *Ob utverzhdenii Klimaticheskoi doktriny Rossiiskoi Federatsii : Ukaz prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 26.10.2023 No. 812*. [On approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation of 26.10.2023 No. 812]. *Konsul'tantPlyus: ofits. sait*. – URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/82279.html>.
5. *Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsii i pokazatelei po voprosam adaptatsii k izmeneniyam klimata (vmeste s «Metodicheskimi rekomendatsiyami po otsenke klimaticheskikh riskov», «Metodicheskimi rekomendatsiyami po ranzhirovaniyu adaptatsionnykh meropriyatii po stepeni ikh prioritnosti», «Metodicheskimi rekomendatsiyami po formirovaniyu otraslevykh, regional'nykh i korporativnykh planov adaptatsii k izmeneniyam klimata»)* : *prikaz Minekonomrazvitiya Rossii ot 13.05.2021 No. 267* [On approval of methodological recommendations and indicators on adaptation to climate change (together with the «Methodological recommendations for assessing climate risks», «Methodological recommendations for ranking adaptation measures according to their degree of priority», «Methodological recommendations for the formation of industry, regional and corporate plans for adaptation to climate change»): order of the Ministry of Economic Development of Russia dated 13.05.2021 No. 267]. *Konsul'tantPlyus: ofits. sait*. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_384470/2ff7a8c72de3994f30496a0ccb1ddafdaddd518.
6. *Ob utverzhdenii tipovoi formy i sostava lesnogo plana sub"ekta Rossiiskoi Federatsii, poryadka ego podgotovki i vneseniya v nego izmenenii* : *prikaz Minprirody Rossii ot 20.12.2017 No. 692*. [On approval of the standard form and

composition of the forest plan of a constituent entity of the Russian Federation, the procedure for its preparation and amendments to it: order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 20.12.2017 No. 692]. Konsul'tant-Plyus : ofits. sait. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_295497/.

7. Ob utverzhdenii Pravil vedeniya gosudarstvennogo lesnogo reestra : postanovlenie Pravitel'stva RF ot 25.08.2023 No. 1378. [On approval of the Rules for maintaining the state forest register: Resolution of the Government of the Russian Federation dated 25.08.2023 No. 1378]. AO «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302594633>.

8. Ob utverzhdenii form, sodержaniya i poryadka predstavleniya v forme elektronnoho dokumenta otchet-nosti ob osushchestvlenii peredannykh v sootvetstvii s chast'yu 1 stat'i 83 Lesnogo kodeksa Rossiiskoi Federa-tsii polnomochii, a takzhe poryadka integratsii sootvetstvuyushchikh informatsionnykh sistem, ispol'zuemykh upol-nomochennymi ispolnitel'nymi organami sub"ektov Rossiiskoi Federatsii dlya ucheta dannykh ob ispol'zova-nii, okhrane, o zashchite, vosproizvodstve lesov, s federal'noi gosudarstvennoi informatsionnoi sistemoi les-nogo kompleksa, inymi federal'nymi informatsionnymi sistemami : prikaz Minprirody Rossii ot 18.06.2024 No. 385 [On approval of the forms, content and procedure for submitting reports in the form of an electronic document on the implementation of powers transferred in accordance with Part 1 of Article 83 of the Forest Code of the Russian Federation, as well as the procedure for integrating the relevant information systems used by authorized executive bodies of the constituent entities of the Russian Federation to record data on the use, protection, conservation, and reproduction of forests, with the federal state information system of the forest complex and other federal information systems: order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 18.06.2024 No. 385]. AO «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306919712>.

9. Nauchno-prikladnoi spravochnik «Klimat Rossii» [Scientific and applied reference book «Climate of Russia»]. VNIIGMI-MTsD. 2024; URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/>.

10. Nedbaev I.S., Semenova E.I., Soroka A.O. Otsenka uyazvimosti lesov k klimaticheskim izmeneniyam // Okhrana, innovatsionnoe vosstanovlenie i ustoichivoe upravlenie lesami. Forestry-2023: Materialy Mezhdunarodnogo lesnogo foruma, 13 oktyabrya 2023 g., Voronezh. [Assessing forest vulnerability to climate change // Protection, innovative restoration and sustainable management of forests. Forestry-2023: Proceedings of the International Forestry Forum, October 13, 2023, Voronezh]. Voronezh : Voronezhskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet im. G.F. Morozova. 2023; 98-114. DOI: 10.58168/Forestry2023_98-114.

11. Boulanger Y., D.T. Price, Cyr D., Sainte-Marie G. Stand-level drivers most important in determining boreal forest response to climate change. Journal of Ecology, 2017; 106 (3): 977-990. DOI: 10.1111/1365-2745.12892.

12. McDowell N.G., Allen C.D. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. Nature Climate Change. 2015; 5: 669-672. DOI: 10.1038/nclimate2641.

13. Balshi M.S., McGuire D.A., Duffy P., Flannigan M.D., Walsh J., Melillo J. Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a multivariate adaptive regression splines (MARS) approach. Global Change Biology. 2008; 15: 578-600. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01679.x.

14. Boulanger Y., Arseneault D., Morin H., Jardon Y., Bertrand P., Dagneau. C. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana* Clem.) outbreaks in southern Québec for the last 400 years. Canadian Journal of Forest Research. 2012; 42: 1264-1276. DOI: 10.1139/x2012-069.

15. Matthews S.N., Iverson L.R., Prasad A.M., Peters M.P., Rodewald P.G. Modifying climate change habitat models using tree species-specific assessments of model uncertainty and life history-factors. Forest Ecology and Management. 2011; 262: 1460-1472. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.06.047.

16. Lipka O.N., Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Mazmanyants G.A., Isupova M.V., Aleinikov A.A. Klimaticheskii effekt vosstanovleniya lesov v del'te r. Ili [Climatic effect of forest restoration in the Ili River delta]. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geogra-ficheskaya. 2021; 85(4). – С. 579-594. – DOI: 10.31857/S2587556621040051.

17. Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya gosudarstvennoi inventarizatsii lesov : prikaz Minprirody Rossii ot 27.09.2021 No. 686. [On approval of the Procedure for conducting state forest inventories: order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated September 27, 2021 No. 686]. AO «Kodeks». URL: <https://docs.cntd.ru/document/727092651>.

18. Belyaeva N.V., Danilov D.A. *Zakonomernosti funktsionirovaniya sosnovykh i elovykh fitotsenozov na ob"ektakh rubok ukhoda i kompleksnogo ukhoda za lesom* [Patterns of functioning of pine and spruce phytocenoses at sites of thinning and complex forest care]. Izd-vo Politekhnikheskogo universiteta. 2014. 164 s.
19. *Torfyanye pozhary*. [Peat fires]. URL: <https://10.mchs.gov.ru/uploads/resource/2022-03-29/468f5f997304de050f754e5015db0c9e.pdf>.
20. Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I. *Glubina progoraniya torfa i pote-ri ugleroda pri lesnom podzemnom pozhare* [Depth of peat combustion and carbon losses in a forest underground fire]. Lesovedenie. 2020; 5: 410-422. DOI: 10.1134/S0024114819050097.
21. Sirin A.A., Medvedeva M.A., Il'yasov D.V., Korotkov V.N, Minaeva T.Yu., Suvorov G.G. *Obvodnennye torfyaniki v klimaticheskoi otchetnosti Rossiiskoi Federatsii*. [Flooded peatlands in the climate reporting of the Russian Federation]. Fundamental'naya i prikladnaya klima-tologiya. 2021; 7(3): 84-101. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-84-112.
22. Nedbaev I.S., Semenova E.I., Soroka A.O. *Opreделение porogovykh znachenii pokazatelei riska uve-licheniya kolichestva lesnykh pozharov v kontekste izmeneniya klimata* [Determination of threshold values of risk indicators of an increase in the number of forest fires in the context of climate change]. Trudy SPbNILKh. 2024; 234-237. DOI: 10.21178/160524.234.
23. Soroka A.O., Nedbaev I.S., Semenova E.I. *Analiz urovnya adaptatsii lesov v naibolee uyazvimykh k klimaticheskim izmeneniyam sub"ektakh RF*. [Analysis of the level of forest adaptation in the constituent entities of the Russian Federation most vulnerable to climate change]. Stolyarovskie chteniya : Sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 95-letiyu akademika D.P. Stolyarova ot 5 oktyabrya 2023 g. 2023; 62-66. DOI: 10.21178/05102023.62.
24. Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Shulyak P.P., Chestnykh O.V. *Sovremennoe sokrashchenie stoka ugleroda v lesa Rossii*. [Modern reduction of carbon sink in Russ. forests]. Doklady Akademii Nauk. 2017; 476(6): 219-721. DOI: 10.7868/S0869565217300259.
25. Niu P., Jiang Y., Yang Y., Wang L. *The characteristics and influencing factors of change in farmland system vulnerability: A case study of Sanmenxia City, China*. Front. Environ. Sci. 10:887570. 2022; 10: 1-19. DOI: 10.3389/fenvs.2022.887570.

Сведения об авторах

✉ *Константинов Артем Васильевич* – доктор с.-х. наук, заместитель директора по научной работе, ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., 21, Санкт-Петербург. Российская Федерация, 194021, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1864-9313>, e-mail: konstantinov_a82@mail.ru.

Якушева Татьяна Викторовна – начальник отдела лесного проектирования, ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., 21, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7635-7327>, e-mail: ytvles@mail.ru.

Выродова Светлана Александровна – ведущий специалист научно-исследовательского отдела селекции, воспроизводства и химического ухода за лесом, ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., 21, Санкт-Петербург. Российская Федерация, 194021, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6106-3967>, e-mail: svyrodoval@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Artem V. Konstantinov* – Dr. Sci. (Agric.), Deputy Director for Research, Saint-Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1864-9313>, e-mail: konstantinov_a82@mail.ru.

Tatyana V. Yakusheva – Head of Forestry Design Department, Saint-Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7635-7327>, e-mail: ytvles@mail.ru.

Svetlana A. Vyrodova – Leading specialist of the research department of selection, reproduction and chemical forest care, Saint-Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky pr., 21, Saint Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6106-3967>, e-mail: svyrodoval@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/11>

УДК 630*23:502.37/38(98)



Технологии и способы восстановления нарушенных земель Крайнего Севера

Наталья В. Яковенко ¹, n.v.yakovenko71@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>

Елена А. Сурина², surina_ea@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8159-8977>

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

²ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ул. Никитова, 13, г. Архангельск, 163062, Российская Федерация

Статья посвящена актуальной проблеме восстановления нарушенных земель в Арктической зоне России, где площадь деградированных территорий превышает 86 тысяч гектаров. Цель исследования — разработка научно обоснованных подходов к рекультивации для ключевых регионов: Мурманской, Архангельской областей и Республики Карелия.

На основе анализа данных лесовосстановления (2007–2024 гг.) и обобщения отечественного опыта доказано, что успех рекультивации зависит от учёта региональной специфики. Для каждого региона определены приоритетные направления работ — от санитарно-гигиенических до лесохозяйственных.

Наиболее эффективными технологиями признаны посадка стандартного посадочного материала (сосна, ель, береза, устойчивые интродуценты) и аэросев на труднодоступных территориях с нормами высева 1,0–1,8 кг/га. Подробно описаны методы подготовки почвы, состав травосмесей и необходимость последующих уходов.

Результаты работы имеют практическую ценность для органов лесного хозяйства и предприятий, ведущих деятельность в Арктике. Комплексное применение предложенных мер позволит повысить эффективность восстановления экосистем и обеспечить устойчивое развитие региона.

Ключевые слова: технология, леса, рекультивация, лесовосстановление, уход за лесом, рост, приживаемость

Финансирование: Исследования проведены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» в сфере деятельности Рослесхоза, № НИОКТР 123032700030-9, АААА – А17-117030110096-5.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Яковенко, Н. В. Технологии и способы восстановления нарушенных земель Крайнего Севера / Н. В. Яковенко, Е. А. Сурина // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 166–185. – Библиогр.: с. 181–184 (32 назв). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/11>

Поступила 25.08.2025. Пересмотрена 03.09.2025. Принята 15.09.2025. Опубликована онлайн 25.09.2025.

Article

Technologies and methods of restoration of disturbed lands of the Far North

Natalia V. Yakovenko ¹, n.v.yakovenko71@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>
Elena A. Surina², surina_ea@sevniilh-arh.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8159-8977>

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

²Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the urgent problem of restoration of disturbed lands in the Arctic zone of Russia, where the area of degraded territories exceeds 86 thousand hectares. The purpose of the study is to develop scientifically based approaches to reclamation for key regions: Murmansk, Arkhangelsk regions and the Republic of Karelia.

Based on the analysis of reforestation data (2007-2024) and generalization of domestic experience, it is proved that the success of reclamation depends on taking into account regional specifics. Priority areas of work have been identified for each region, from sanitary and hygienic to forestry.

The most effective technologies are the planting of standard planting material (pine, spruce, birch, resistant introduced plants) and aerial sowing in hard-to-reach areas with seeding rates of 1.0-1.8 kg/ha. The methods of soil preparation, the composition of grass mixtures and the need for subsequent care are described in detail.

The results of the work are of practical value for forestry authorities and enterprises operating in the Arctic. The integrated application of the proposed measures will improve the efficiency of ecosystem restoration and ensure the sustainable development of the region.

Keywords: *technology, forests, reforestation, reclamation, reforestation, thinning, growth, establishment*

Funding: the research carried out within the framework of the state task «Conducting applied scientific research» in the sphere of activity of Rosleskhoz, No. AAAA-A17-11703011096-5, 123032700030-9

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

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

For citation: Yakovenko N. V., Surina E. A. (2025). Technologies and methods of restoration of disturbed lands of the Far North. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 166-185 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/11>

Received 25.08.2025. **Revised** 03.09.2025. **Accepted** 15.09.2025. **Published online** 25.09.2025.

Введение

Освоение северных территорий, сопровождающееся интенсивным развитием добывающей промышленности, имеет своим следствием масштабные экологические последствия. Приарктические леса и прилегающие к ним экосистемы, отличающиеся

особой хрупкостью и низкой скоростью самовосстановления, уже сегодня испытывают на себе тяжелые последствия антропогенного прессинга и зачастую безграмотного использования природных ресурсов. Деятельность горнодобывающих, нефтегазовых и лесопромышленных предприятий приводит к формированию обширных техногенных ландшафтов:

карьеров, отвалов, хвостохранилищ, территорий, загрязненных выбросами и нефтепродуктами. Результатом является полное уничтожение почвенно-растительного покрова, нарушение гидрологического режима, деградация естественной среды обитания и, как следствие, потеря биоразнообразия и хозяйственного потенциала земель.

Масштабы проблемы приобретают характер экологического кризиса регионального значения. Согласно официальным данным Росприроднадзора (2025), на конец 2024 года общая площадь нарушенных земель в северных регионах России достигла 86 133 га. Географическое распределение этих территорий крайне неравномерно и концентрируется в ключевых промышленных субъектах: наибольшая доля приходится на Республику Коми (44%) и Ненецкий автономный округ (23%), значительные площади нарушены в Мурманской (25%) и Архангельской (7%) областях [1]. Данная статистика наглядно демонстрирует острую необходимость в систематическом и научно обоснованном подходе к восстановлению этих земель.

Процесс возвращения нарушенных территорий в природно-хозяйственный оборот — рекультивация — является сложным, многоэтапным и капиталоемким мероприятием [12], требующим учета всего комплекса природно-климатических и техногенных факторов. Как убедительно доказывают многочисленные исследования [2-11], успех рекультивации напрямую зависит от конкретных условий нарушенной территории. Ключевая задача этого процесса, по меткому выражению Л. В. Моториной (1975), заключается не просто в формальном «озеленении» пустошей, а в целенаправленном создании на их месте новых, более продуктивных и устойчивых ландшафтов, обладающих высокой хозяйственной, эстетической и природоохранной ценностью.

Центральное место в биологической рекультивации отводится лесовосстановлению, как наиболее эффективному способу восстановления экологического каркаса территорий. Многолетний опыт свидетельствует, что посадка лесных культур является более надежным методом по сравнению с посевом, обеспечивая высокую и управляемую приживаемость сеянцев [16, 17]. При этом критически важным является не просто густота посадки, а научно

обоснованное размещение посадочного материала на территории [18]. Проблемам лесной рекультивации техногенных ландшафтов посвящены работы целого ряда отечественных ученых [19-25], что подчеркивает комплексный и междисциплинарный характер этой проблемы.

Современные вызовы требуют современных решений. В ответ на это разрабатываются и успешно апробируются инновационные биоинженерные технологии. Ярким примером является работа научной школы под руководством профессора В.В. Никонова, разработавшей и внедрившей эффективные методики восстановления земель, загрязненных выбросами медно-никелевых производств [26-29]. Широкое применение находят такие технологии, как использование биоматов — полотен из растительных волокон, которые стабилизируют грунт и создают оптимальные условия для прорастания семян [14].

Для реабилитации труднодоступных территорий со сложным рельефом (отвалы, крутые склоны, карьерные выемки), где механизированная посадка саженцев затруднена или экономически нецелесообразна, высокий потенциал демонстрирует метод аэропосева (аэросева). Его положительные результаты были подтверждены в условиях Архангельской и Вологодской областей [30]. Анализ международного опыта (США, Канада, Австралия, Новая Зеландия) и экспертных оценок [31, 32] указывает на успешное применение аэропосева для лесовосстановления, в том числе хвойных пород, при обязательной предварительной подготовке территории (например, дискование или бороздование) для обеспечения контакта семян с минеральным слоем почвы.

Целью данной работы является комплексный анализ и обобщение существующих методов рекультивации нарушенных земель в условиях Приарктических регионов России, а также оценка эффективности и определение областей целесообразного применения традиционных (посадка саженцев) и инновационных (биоматы, аэропосев) технологий для восстановления экологического баланса и продуктивности этих стратегически важных территорий.

Материалы и методы исследования

Объект и предмет исследований

Объектом исследования выступили нарушенные земли, образовавшиеся в результате деятельности горнодобывающих предприятий по разработке месторождений песка и песчано-гравийного материала (ПГМ) в пределах Арктической зоны Российской Федерации. Исследование проводилось на территориях Архангельской области, Республики Карелия и Мурманской области, характеризующихся схожими северными таежными условиями, но различающихся степенью антропогенной нагрузки и спецификой нарушений.

Предметом исследования является процесс лесовосстановления на указанных нарушенных территориях, включая анализ эффективности различных методов: естественного восстановления, содействия естественному восстановлению и искусственного лесовосстановления (создания лесных культур).

Сбор и анализ данных

Основу исследования составили данные натурных обследований и камерального анализа. Для оценки эффективности лесовосстановления были изучены участки с различным состоянием растительного покрова: территории с естественным восстановлением леса, зоны, где применялись меры по содействию естественному возобновлению, и искусственно созданные лесные культуры. В ходе полевых работ на ключевых участках проводилась оценка таксационных показателей, включая состав и густоту древостоя, сохранность посадок, а также характеристики живого напочвенного покрова.

Дополнительным источником информации послужили материалы лесоустройства и официальные данные инвентаризации лесных культур, что позволило проанализировать динамику восстановительных процессов на значительных площадях за продолжительный временной период. Для выявления общих закономерностей и региональных особенностей был применен сравнительно-географический метод, сопоставляющий условия и результаты лесовосстановления в разных субъектах Российской Федерации.

Сравнительно-аналитический метод позволил провести комплексную оценку эффективности различных подходов к рекультивации на основе изученных литературных источников и собственных данных, учитывая такие критерии, как скорость восстановления, устойчивость формирующихся насаждений и их хозяйственная ценность.

Таким образом, методика исследования основана на комплексном подходе, сочетающем полевые наблюдения, анализ официальных источников информации и статистическую обработку данных, что позволяет обеспечить достоверность и обоснованность полученных выводов.

Результаты и обсуждение

Проведенный анализ данных отчетности по лесовосстановлению за период 2007-2024 гг. и детальное изучение региональных особенностей нарушенных земель Арктической зоны Российской Федерации позволили не только констатировать текущее состояние дел, но и сформулировать научно обоснованные рекомендации по выбору направлений и технологий рекультивации. Полученные результаты выявляют четкую региональную специфику, обусловленную как природно-климатическими условиями, так и характером антропогенного воздействия, и позволяют перейти к их детальному обсуждению и систематизации. Преимущественно используется способ естественного лесовосстановления. На Арктической территории отдают предпочтение наименее затратным и упрощенным технологиям лесовосстановления.

Выбор направлений рекординации для арктических регионов России определяется комплексным анализом, в основе которого лежит совокупность взаимосвязанных критериев. Ключевым фактором выступают уникальные природно-климатические условия, включающие специфику рельефа, состав почв и грунтов, а также суровый климат, диктующий необходимость использования морозостойких растений и особых сроков проведения работ.

Существенное влияние оказывает характер и степень нарушения земель, поскольку именно тип

антропогенного воздействия определяет приоритетные меры — от срочной санитарно-гигиенической локализации опасных загрязнений до преобразования техногенного рельефа. Важную роль играет и экономическая составляющая, в силу которой предпочтение часто отдается менее затратным и упрощенным технологиям, таким как естественное зарастивание.

Выбор также зависит от целевого назначения восстанавливаемых территорий, будь то возвращение земле хозяйственной функции или обеспечение защитной и экологической роли для *nearby* населенных пунктов. Наконец, решения основываются на апробированном научно-практическом опыте, используя уже доказавшие свою эффективность методы и технологии для конкретных условий Арктики.

Таким образом, стратегия рекультивации формируется не произвольно, а является результатом всесторонней оценки региональных природных, технологических, экономических и социальных факторов, что позволяет найти наиболее рациональный путь восстановления хрупких арктических экосистем.

На основе критериев определены направления рекультивации нарушенных земель по регионам Арктической зоны Российской Федерации:

в Мурманской области: санитарно-гигиеническое направление для отработанных хвостохранилищ обогатительных фабрик и мест аварийного сброса пульпы; комбинированное, включающее при близком уровне грунтовых вод создание водоемов в понижениях техногенного рельефа (водохозяйственное направление), посадку сеянцев, саженцев, черенков на повышенных участках откосов (лесохозяйственное направление), посев многолетних трав; содействие естественному зарастанию отвалов, сложенных скальными породами, заключающееся в рациональном складировании вскрышных пород с учетом возможности их естественного зарастания.

в Архангельской области: лесохозяйственное; — санитарно-гигиеническое; устранение негативного влияния нарушенного ландшафта на селитебные территории, населенные пункты.

в Республике Карелия: сельскохозяйственное; санитарно-гигиеническое;

водохозяйственное; устранение негативного влияния нарушенного ландшафта на селитебные территории, населенные пункты (лесохозяйственное).

Архангельская область

В качестве минеральных удобрений рекомендуется азото-фосфорно-калийное удобрение N45P45K45 на 1 га. В качестве органического удобрения используют навоз. Семена трав сеют не глубже 3 см, дискование до 14 см.

Искусственное лесовосстановление проводится в случае, если невозможно обеспечить естественное лесовосстановление. Используется преимущественно метод посадки, которым закладываются культуры основных лесобразующих пород — сосны и ели. Посадки в заранее подготовленные посадочные места без предварительной сплошной обработки почвы.

Для посадки применяется только стандартный посадочный материал с открытой и закрытой корневой системой в ряду — 1 м, с расстоянием между рядами 5 м. За исключением плотных, влажных и переувлажненных почв возможно также использовать технологию подготовки почвы под посадку, минерализации почвы экскаватором. Традиционно эти работы выполняются бульдозером и лесным плугом, что осложнено необходимостью проводить раскорчевку пней и невозможно при не сплошных рубках (которые по факту делаются, оставляя на корню лиственные деревья).

Аэросев семян ели на гарях трехлетней давности, где умеренно развит лесной покров из иван-чая (со степенью покрытия 0,4-0,5). Лучшее время аэросева семян хвойных пород — весна (апрель — по снежному покрову, первая и вторая декады мая — непосредственно после таяния снега). Осенний посев (сентябрь и октябрь) вследствие низкой грунтовой всхожести семян проводить нецелесообразно.

Оптимальными нормами высева семян первого класса сортности при аэросеве следует считать: на паловых и кипрейно-паловых вырубках с обнажением поверхности почвы огнем до 70-80 % — для сосны 1,0, для ели 1,2 кг; на свежих вырубках из-под зеленомошных типов леса с минерализацией почвы более 40% — для сосны 1,5, для ели 1,8 кг/га.

Лесоводственный уход проводится до смыкания крон культивируемых деревьев и кустарников.

После смыкания крон деревьев и кустарников осуществляется уход за лесными насаждениями в соответствии с лесным законодательством Российской Федерации – ныне действующим Приказом Минприроды России от 30.07.2020 № 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами». Уходы за культурами проводят по мере их зарастания. При применении удобрений развитие травяного покрова усиливается, количество уходов необходимо увеличить (на 1-2 в год).

Мурманская область

Важное место должно занять создание запасов растительных почвогрунтов, приобретение извести или ее заменителей, приобретение минеральных удобрений для подготовки субстратов. Заготовку почвогрунта можно осуществлять с середины лета до глубокой осени. Мероприятия по мелиорации пустырей и техногенных пустынь посредством торфования, известкования и внесения удобрений весной, после оттаивания верхнего 10 см слоя грунтов. В числе подготовительных работ может быть уделено внимание (подготовке) почвогрунтов и субстратов. Желательно, чтобы почвогрунты какое-то время могли вылежаться.

Планировка поверхности заключается в удалении камней, валунов. Необходимо учитывать эрозионные процессы на территории: чем круче склоны, тем выше опасность сноса, смыва. В таких местах в порядке подготовки участков под облесение требуется плантажная вспашка с уборкой камней. После создания на участке слоя почвогрунта не менее 11 см проводится дискование участка и прикатывание поверхности. Затем проводится высеv травосмеси. При осуществлении залужения имеет смысл использовать различные виды мелиорантов. Необходимо учитывать, что использование злаков позволяет быстрее закрепить поверхность почвогрунта, снизить эрозию. Однако злаки мало эффективны с точки зрения повышения плодородия и углубления почвообразовательных процессов на мёртвых грунтах. Более эффективны травосмеси из злаков (ежа сборная, овсяница овечья, овсяница красная полевица, мятлики) с участием разнотравья

(подмаренников, крапивы двудомной, тысячелистника, черноголовника, шлемника, ястребинок, золотарника, пижмы, василистника, щавеля, шмеля). Оправдано введение в смеси азотонакопителей (некоторых видов клеверов, люпина многолетнего, горошка мышиного). На участках с посадками или с наличием естественной древесной растительности сжигание травы или случайное возникновение пожаров приведут к их повреждению. Возможно потребуется определенный подбор трав, снижение в травосмесях доли высокорослых злаков.

При гнездовых посадках на 1 га требуется 600 м³ грунта, тогда как при сплошной посадке 2 тыс. м³.

Сеянцы желательно привязывать к колыям. Важнейшее условие приживаемости – обильный полив, сразу же после посадки. При посадках в весенне-летний период полив повторяется через 7 дней, в зависимости от погодных условий. При осенних работах достаточен один прием полива. Значительный эффект может быть достигнут подготовкой почвы под естественный налет семян в еловых и сосновых редирах. Высокой эффективностью при реабилитации нарушенных природных комплексов залужение минерализованных почвогрунтов.

По периферии интенсивного поражения природных комплексов может найти применение упрощенный способ, заключающийся в разбрасывании семян трав с торфяной крошкой. Доза смеси семян сокращается относительно нормы вдвое (8-10 кг/га). Посев должен осуществляться осенью. При разбрасывании почвогрунта с семенами трав могут быть применены разбрасыватели типа РТО, КСА-3, агрегированные легкими тракторами типа МТЗ-75 и т.д. На более влажных увеличивают норму посева, к смеси мелиоранта добавляют известь или золу с минеральными удобрениями (аммиачная селитра, калийная соль, суперфосфат и т.д.). Посадка может осуществляться сеянцами, саженцами или дичками. Не исключается создание насаждений посевом семян. При подготовке почвы используются обычные тракторные плуги, дисковые бороны и серийные лесопосадочные машины (типа СЛН-1, СЛН-2). Саженцы берёзы, ивы пятитычинковой (*Salix pentandra* L.), ивы козьей (*Salix caprea* L.), тополей и рябины, сеянцев хвойных пород (сосны, ели, лиственницы).

высаживают с дистанцией в рядах 2,0-2,5 между рядами при многоприемных посадках – 5,0-5,5 м, при посадках в один прием – в среднем 2,5 м. И в тех случаях, когда вводят кустарники расстояние между деревьями с кустарниками сокращается до 1,2-1,5 м, а в рядах кустарников до 1 м. При создании плотных посадок типа живых изгородей дистанцию между кустарниками в рядах сокращают до 0,4-0,5 м. Такие же в среднем придержки следует использовать также при создании других категорий насаждений: рядов, аллей, полос. Для хорошего приживания саженцев и успешного их роста в будущем следует соблюдать минимальные размеры посадочных ям, лунок. Яма (траншея) для крупных (высотой 2-3 м) саженцев (черенков) тополя, саженцев березы повислой (*Betula pendula* Roth.), рябины должна иметь глубину не менее 0,4 м. Для саженцев и дичков средних размеров (1,0-2,5 м), для саженцев и дичков ивы филиколистной (*Salix phylicifolia* L.), ивы чернеющей (*Salix myrsinifolia* Salisb), ивы сизой (*Salix glauca* L.), для березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и березы извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb), для караганы древовидной (желтой) (*Caragana arborescens* Lam), крушины, не образующих крупные деревья глубина ямы 0,36-0,46 м. Для кустарников глубина ям, лунок, траншей 24-36 см. Для Крайнего Севера в условиях формирования мелких слабо развитых почв характерна тенденция к образованию древесными породами и кустарниками корневых систем поверхностного типа. В таких условиях при создании насаждений оправдана подготовка посадочных мест не столько глубоких, сколько широких. Для крупных деревьев 1х1 м, для средних по размерам – 0,8 х 0,8 м, для кустарников – 0,6 х 0,6 м, стенки посадочных мест не должны быть отвесными. На мелиорируемых территориях при создании массивных посадок сосны, ели, лиственницы, в том числе в смеси с лиственными саженцами (0,3-0,4 м), посадочные места можно готовить в виде глубоких (0,2 м) борозд или производить посадки в лунки (0,3х0,3 м), заполненные почвой. В качестве дичков могут использоваться 3-10-летние растения березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), березы повислой (*Betula pendula* Roth.), березы извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb), рябины, ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench), осины, ивы козьей (*Salix caprea* L.),

ивы филиколистной (*Salix phylicifolia* L.), ивы кольской (*Salix kolaensis* Schljakov), ивы пятитычинковой (*Salix pentandra* L.), жимолости синей (*Lonicera caerulea* L.), шиповника, смородины. Посадка дичков на участках пустошей и техногенных пустынь целесообразно производить поздней осенью, не дожидаясь, впрочем, сильных морозов и снега. Посадки саженцев и сеянцев хвойных при массовом лесоразведении может производиться весной, и осенью.

Создание насаждением с использованием интродуцированных пород, а также всех пород при выращивании их в питомнике лучше производить поздней осенью. Среди интродуцентов необходимо отдавать предпочтение тополю душистому (*Populus suaveolens* Fisch.) и тополю берлинскому (*Populus × berolinensis* K. Koch), их гибридным формам, караганы древовидной (желтой) (*Caragana arborescens* Lam), и караганы кустарниковой (*Caragana frutex* (L.) C. Koch), крушине ломкой (*Frangula alnus* Mill.), спиреи средней (*Spiraea media* Fr. Schmidt) и спиреи дубравколистной (*Spiraea chamaedryfolia* Martti), сирени венгерской (*Syringa josikaea* Jacq. fil.) и сирени мохнатой (*Syringa villosa* Vahl), боярышнику обыкновенному (*Crataegus oxyacantha* L.) и боярышнику сибирскому (*Crataegus sanguinea* Pall.), жимолости обыкновенной (*Lonicera xylosteum* L.), жимолости синей (*Lonicera caerulea* L.), жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.), и возможно районированных климатипов лиственницы сибирской (Сукачева) (*Larix sukaczewii* Djil.). На особо ответственных участках дерева и крупные кустарники на период приживания целесообразно крепить растяжками к кольям. Крепления требуют и более крупные черенки тополей, некоторые крупные виды ив и рябины.

За исключением плотных, влажных и переувлажненных почв возможно также использовать технологию подготовки почвы под посадку, минерализации почвы экскаватором. Традиционно эти работы выполняются бульдозером и лесным плугом, что осложнено необходимостью проводить раскорчевку пней и невозможно при не сплошных рубках (которые по факту делаются, оставляя на корню лиственные деревья). Эта проблема решена за счет перехода к экскаваторному способу подготовки

почвы. Посадка ручным способом при помощи «посадочной трубы» диаметром 55 мм, одним человеком.

Оптимальными нормами высева семян первого класса сортности при аэросеве следует считать: на паловых и кипрейно-паловых вырубках с обнажением поверхности почвы огнем до 70-80 % – для сосны 1,0, для ели 1,2 кг; на свежих вырубках из-под зеленомошных типов леса с минерализацией почвы более 40% – для сосны 1,5, для ели 1,8 кг/га.

Наличие валежника и порубочных остатков на лесосеках положительно сказывается на результатах аэросева семян ели. Здесь молодые елочки меньше страдают от солнечных ожогов, заморозков и выжимания морозом. Лесоводственный уход проводится до смыкания крон культивируемых деревьев и кустарников. После смыкания крон деревьев и кустарников осуществляется уход за лесными насаждениями в соответствии с лесным законодательством Российской Федерации – ныне действующим Приказом Минприроды России от 30.07.2020 № 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами».

Уходы за культурами проводят по мере их зарастания. При применении удобрений развитие травяного покрова усиливается, количество уходов необходимо увеличить (на 1-2 в год).

Республика Карелия

Вспашка проводится на глубину не более 20 см. Использование дисковых орудий для рыхления верхнего слоя почвы. Дискование проводят гусеничным трактором с бороной дисковой тяжелой БДТ-3. При создании злаковых травостоев применяются азотные – 30 кг/га, фосфорные – 60 кг/га, калийные – 60 кг/га. Травосмеси создаются путем сочетания видов различных жизненных форм: длиннокорневищных, рыхло- или плотнокустовых и растений с универсальной корневой системой. Принятый состав травосмеси: Лисохвост луговой (*Alopecurus* (12-14 кг/га) + овсяница луговая (*Festuca pratensis* (6-8 кг/га) + тимофеевка луговая (*Phleum pratense* (4-6 кг/га).

За исключением плотных, влажных и переувлажненных почв возможно использовать технологию подготовки почвы под посадку, минерализации почвы экскаватором. Тогда посадка производится

ручным способом при помощи «посадочной трубы» диаметром 55 мм, одним человеком.

Аэросев применим для труднодоступных территорий, где посадки затруднены, для территорий с неровным рельефом – с возвышенностями, склонами, а также там, где имеются трудности, чтобы привить лесную культуру. Аэросев семян ели на галях трехлетней давности, где умеренно развит покров из иван-чая (со степенью покрытия 0,4-0,5). Лучшее время аэросева семян хвойных пород – весна (апрель – по снежному покрову, первая и вторая декады мая – непосредственно после таяния снега). Осенний посев (сентябрь и октябрь) вследствие низкой грунтовой всхожести семян проводить нецелесообразно.

Оптимальными нормами высева семян первого класса сортности при аэросеве следует считать: на паловых и кипрейно-паловых вырубках с обнажением поверхности почвы огнем до 70-80% – для сосны 1,0, для ели 1,2 кг; на свежих вырубках из-под зеленомошных типов леса с минерализацией почвы более 40 % – для сосны 1,5, для ели 1,8 кг/га.

Наличие валежника и порубочных остатков на лесосеках положительно сказывается на результатах аэросева семян ели. Здесь молодые елочки меньше страдают от солнечных ожогов, заморозков и выжимания морозом.

Лесоводственный уход проводится до смыкания крон культивируемых деревьев и кустарников. После смыкания крон деревьев и кустарников осуществляется уход за лесными насаждениями в соответствии с лесным законодательством Российской Федерации – ныне действующим Приказом Минприроды России от 30.07.2020 № 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами». Уходы за культурами проводят по мере их зарастания. При применении удобрений развитие травяного покрова усиливается, количество уходов необходимо увеличить (на 1-2 в год).

Лучшие показатели по приживаемости и приросту в этих условиях отмечены у светолюбивых морозостойких видов, таких как лиственница сибирская, береза повислая (бородавчатая) (*Betula pendula* Roth), облепиха, карагана древовидная (*Caragana arborescens* Lam.) (табл. 1).

Породный состав лесных культур на нарушенных землях
Species composition of forest culture on disturbed lands

Лесорастительная зона Area for forest growing	Ассортимент культивируемых пород Range of cultivated species	
	Нетоксичные и слаботоксичные грунты Non-toxic and low-toxic soils	Средне- и сильнотоксичные грунты Medium- and highly toxic soils
Лесная зона Forest zone	сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.) scots pine, береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth) silver birch, ольха серая (<i>Alnus incana</i> (L.) Moench) hoary alder и ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.) black alder, карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i> Lam.) siberian pea tree	ольха серая (<i>Alnus incana</i> (L.) Moench) hoary alder, ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.) black alder, береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth) silver birch

Выбор древесных пород для лесовосстановления на нарушенных землях представляет собой сложный многофакторный процесс, основанный на глубоком анализе экологических условий и целевых функций будущих насаждений.

Ключевым определяющим фактором выступает степень химической деградации субстрата. На землях с незначительным загрязнением или его полным отсутствием стратегия направлена на восстановление продуктивных и устойчивых лесных экосистем, максимально приближенных к природным аналогам. В лесной зоне, например, это подразумевает использование традиционных хозяйственно-ценных хвойных пород, таких как сосна обыкновенная и ель, способных сформировать высокопродуктивные древостой. Лиственные виды, включая березу повислую, играют важную роль пионеров, подготавливающих условия для последующего внедрения более требовательных хвойных пород.

Совершенно иной подход применяется для реабилитации территорий со средним и высоким уровнем токсического загрязнения, таких как отвалы горных пород или хвостохранилища. Основной задачей здесь становится не экономическая эффективность, а экологическая санация и стабилизация субстрата. Приоритет отдается видам-фитомелиорантам, обладающим уникальным комплексом свойств для выживания и улучшения почв в экстремальных условиях. Такие породы, как ольха серая и черная,

способны вступать в симбиоз с азотфиксирующими бактериями, что позволяет им обогащать бедные и токсичные грунты жизненно важным азотом. Другие виды, например, некоторые ивы и тополя, отличаются быстрым ростом и высокой толерантностью к тяжелым металлам, эффективно изолируя загрязнители в своей биомассе и формируя защитный растительный покров.

Таким образом, формирование породного состава представляет собой научно обоснованный выбор, балансирующий между необходимостью восстановления хозяйственной ценности земель и их срочной экологической реабилитации в зависимости от исходной степени деградации.

В таблицах 2 и 3 представлен сравнительный анализ технологий искусственного лесовосстановления, применяемых в субъектах Российской Федерации, входящих в зону северной тайги: Мурманской области, Республике Карелия и Архангельской области. Данные систематизированы по ключевым технологическим операциям, включая способы подготовки площади, виды посадочного материала, методы посадки и последующего агротехнического ухода. Информация позволяет провести сравнительную оценку подходов с учетом лесорастительных и экономических условий каждого региона.

Технологии искусственного лесовосстановления в Мурманской области, в Республике Карелия, в Архангельской области (табл.2, табл.3).

Создание лесных культур (посадка)

Creation of forest cultures (planting)

№ п/п No. p / p	Технологическая операция Technological operation	Механизированные агрегаты Mechanized units	Ед. изм. Unit of measurement	Время выполнения Lead time
1	Копка посадочных ямок (0,3 м×0,3 м×0,3 м) для посадки сеянцев (саженцев) Digging planting holes (0.3 m×0.3 m×0.3 m) for planting seedlings (saplings)	—	Шт. Pc	За 7-10 дней до начала лесокультурных работ 7-10 days before the start of forestry planting works
2	Посадка без кома вручную в подготовленные ямки саженцев высотой до 2 м в возрасте 2-5 лет Manual planting of seedlings up to 2 m tall and 2-5 years old in prepared holes	—	Шт. Pc	За 7-10 дней до начала лесокультурных работ на зональных почвах 7-10 days before the start of forestry planting works on zonal soils
3	Посадка с комом 0,3×0,3 м Planting with a 0.3×0.3 m clod	—	Шт. Pc	За 7-10 дней до начала лесокультурных работ на зональных почвах 7-10 days before the start of forestry planting works on zonal soils
4	Полив деревьев (2 ведра на дерево) с подноской воды на расстояние 41-60 м Watering trees (2 buckets per tree) with water delivery at a distance of 41-60 m	—	Ведро Bucket	Сразу после посадки Immediately after landing
5	Механизированный агротехнический уход Mechanized agrotechnical care	Мотокусто-рез МКР-2,5 Motorcycle saw blade МКР-2,5	Га Ha	До выхода из-под влияния травянистой растительности Before leaving the influence of herbaceous vegetation

6	Лесоводственный уход (осветление) Forestry care (thinning)	Мотокусторе- рез МКР-2,5 Motorcycle saw blade МКР-2,5	Га На	После смыкания культур After closing the cultures
7	Вспомогательные операции (подвозка посадочного материала, укладка, дополнение) Auxiliary operations (transportation of planting material, laying, and addition)	—	Га На	—

Представленная технологическая схема характеризуется высокой технологичностью при минимальном уровне механизации. Основным инструментом посадки — ручная посадочная труба («пот-типутка») — обеспечивает бережное и быстрое высаживание сеянцев с закрытой корневой системой без нарушения земляного кома, что критически важно для их приживаемости. Этот метод особенно эффективен на труднодоступных участках, где невозможно использовать крупную лесопосадочную технику.

Важной особенностью схемы является строгий учет биологических требований растений. Сроки выполнения основных работ приурочены к оптимальным агротехническим периодам, что обычно означает посадку в фазу максимального увлажнения почвы и благоприятных температурных условий для укоренения.

Схема подчеркивает необходимость много-этапного ухода за культурами, включая агротехнические мероприятия по устранению конкуренции со стороны сорной растительности в первые годы жизни культур и последующие лесоводственные уходы (осветления), направленные на устранение нежелательной древесной растительности после смыкания крон.

Рациональным решением является использование универсального механизированного агрегата

(мотокусторе-за МКР-2,5) для различных видов уходов, что обеспечивает экономию ресурсов и снижает затраты на техническое обслуживание.

В целом, технологическая схема демонстрирует современный адаптивный подход, сочетающий традиционную ручную посадку с эффективным механизированным уходом, что направлено на формирование высококачественных и устойчивых лесных насаждений.

Представленная ниже технологическая карта (таблица 3) регламентирует процесс создания лесных культур с применением сеянцев с закрытой корневой системой (ЗКС), что является ключевым элементом современных интенсивных моделей лесовосстановления. Данная методика представляет собой качественный эволюционный скачок по сравнению с традиционными подходами, основанными на работе с посадочным материалом с открытой корневой системой. Её внедрение направлено на преодоление фундаментальных ограничений, связанных с низкой приживаемостью сеянцев, краткостью оптимальных агротехнических сроков и исключительной трудоёмкостью процесса. Анализ таблицы позволяет выявить системную трансформацию технологического цикла, где биотехническое совершенство посадочного материала обуславливает ревизию всей операционной цепи.

Создание лесных культур (посадка сеянцев с закрытой корневой системой)

Creation of forest crops (planting seedlings with a closed root system)

№ п/п No. p / p	Технологическая операция Technological operation	Механизированные агрегаты Mechanized units	Ед. изм. Unit of measurement	Время выполнения Lead time
1	Посадка сеянцев с заглублением корневой шейки и присыпкой от пересыхания Planting seedlings with the root collar buried and sprinkled to prevent drying out	Посадочная труба «поттипутка» Pottiputka landing tube	Шт. Pc	За 7-10 дней до начала лесокультурных работ 7-10 days before the start of forestry planting works
2	Механизированный агротехнический уход Mechanized agrotechnical care	Мотокусторе́з МКР-2,5 Motorcycle saw blade МКР-2,5	Га Ha	До выхода из-под влияния травянистой растительности Before leaving the influence of herbaceous vegetation
3	Лесоводственный уход (осветление) Forestry care (thinning)	Мотокусторе́з МКР-2,5 Motorcycle saw blade МКР-2,5	Га Ha	После смыкания культур After closing the cultures
4	Вспомогательные операции (подвозка посадочного материала, укладка, дополнение) Auxiliary operations (transportation of planting material, laying, and addition)	Посадочная труба «поттипутка» Pottiputka landing tube	Шт. Pc	За 7-10 дней до начала лесокультурных работ на зональных почвах 7-10 days before the start of forestry planting works on zonal soils

Данная технологическая карта иллюстрирует оптимизированный производственный контур, сформированный вокруг биологических преимуществ сеянцев с ЗКС. Ключевым технологическим звеном выступает операция посадки, выполняемая с применением специализированного ручного инструмента («поттипутки»), который обеспечивает минимальное нарушение почвенной структуры и точное позиционирование корневого кома. Это позволяет полностью исключить из цикла наиболее ресурсоёмкие операции: капитальную подготовку посадочных мест (копку ям) и обязательный последующий полив. Исключение полива является не организационной экономией, а прямым следствием высокой физиологической сохранности корневой системы и её функциональной активности сразу после высадки, что нивелирует водный стресс.

Последующие операции агротехнического и лесоводственного ухода, механизированные с помощью мотокусторе́за, сохраняют классическую структуру, направленную на снижение фитоценотической конкуренции. Однако их эффективность в рамках данной технологии может быть пересмотрена, так как высокая начальная приживаемость и энергия роста сеянцев с ЗКС потенциально сокращают требуемую кратность и интенсивность уходов.

Таким образом, таблица демонстрирует не просто замену одного вида посадочного материала другим, а системную технологическую модернизацию. Она отражает переход от экстенсивной, зависимой от климатических условий и ручного труда модели, к более управляемой и биологически обоснованной системе, где первоначальные инвестиции в качественный посадочный материал компенсируются значительным повышением эффективности на всех последующих этапах лесовосстановительного цикла.

Освоение северных территорий, сопровождающееся интенсивным развитием добывающей промышленности, привело к формированию обширных техногенных ландшафтов и масштабным экологическим последствиям. Хрупкие приарктические экосистемы с низкой скоростью самовосстановления испытывают на себе тяжелейший антропогенный прессинг, что выражается в деградации почвенно-растительного покрова, нарушении гидрологического режима и потере биоразнообразия.

Успешная рекультивация нарушенных земель требует дифференцированного подхода, учитывающего комплекс природно-климатических, технологических и экономических факторов. Ключевое значение имеют специфические северные условия, характер техногенных нарушений и целевое назначение восстанавливаемых территорий.

Проведенное исследование демонстрирует эффективность сочетания традиционных и инновационных методов восстановления. Посадка лесных культур, особенно с использованием саженцев с закрытой корневой системой, подтвердила свою надежность как основной метод лесовосстановления. Одновременно инновационные биоинженерные технологии, такие как аэропосев и применение биоматов, показали высокий потенциал для реабилитации труднодоступных территорий со сложным рельефом.

Для различных северных регионов разработаны практические рекомендации по выбору оптимальных методов рекультивации. В Мурманской области акцент делается на санитарно-гигиенической рекультивации и создании специальных субстратов, в Архангельской области - на лесохозяйственном направлении, а в Республике Карелия применяется

комплексный подход с элементами сельскохозяйственного восстановления.

Таким образом, восстановление нарушенных земель Российского Севера представляет собой сложную, но решаемую задачу. Её успешная реализация возможна через адаптацию технологий к специфическим условиям каждого региона и комбинирование проверенных традиционных методов с современными инновационными подходами. Это позволит не только вернуть продуктивность этим территориям, но и восстановить их экологический потенциал для будущих поколений.

На основе проведенного исследования можно сформулировать четкие, практические рекомендации для различных стейкхолдеров, включая органы власти, предприятия, а также научные и проектные организации.

Для органов государственной власти и регулирования ключевым направлением является утверждение и внедрение дифференцированного регионального подхода в нормативные документы. Это подразумевает установление различных приоритетных направлений рекультивации для каждого субъекта РФ. Например, для Мурманской области приоритетом должна стать санитарно-гигиеническая рекультивация, направленная на локализацию очагов загрязнения и хвостохранилищ. Для Архангельской области более актуальна многоцелевая рекультивация, включающая лесохозяйственные и водохозяйственные мероприятия, а также защиту населенных пунктов. Республике Карелия требуется комбинированный подход, объединяющий сельскохозяйственные, водохозяйственные и санитарно-гигиенические задачи. Параллельно необходимо разработать механизмы экономического стимулирования для предприятий, применяющих инновационные методы, вместо малоэффективных. Важным шагом станет организация на региональном уровне фондов и управляемых запасов плодородных почвогрунтов, мелиорантов и семенного материала аборигенных пород. Также требуется ужесточение требований к долгосрочному мониторингу состояния рекультивированных земель с обязательной публичной отчетностью.

Для недропользователей принципиально важно закладывать современные и научно обоснованные методы рекультивации уже на стадии проектирования освоения месторождений. Выбор технологий должен строго зависеть от конкретных условий. Для стандартных ситуаций рекомендована массовая посадка семян и саженцев с соблюдением оптимальных схем размещения, с активным внедрением семян с закрытой корневой системой для повышения приживаемости. На труднодоступных территориях, таких как отвалы и крутые склоны, следует широко применять метод аэропосева с соблюдением научно обоснованных норм высева и оптимальных сроков. Для укрепления грунтов и ускорения начальных стадий восстановления эффективно использование биоматов и методов залужения со специально подобранными травосмесями. Подбор породного состава должен быть адаптирован к условиям грунтов: на нетоксичных высаживаются основные лесообразующие породы, а на токсичных и сильнонарушенных — виды-фитомелиоранты, такие как ольха, ивы и лох. Успех мероприятий напрямую зависит от неукоснительного соблюдения агротехники, включая сроки посадки, обязательный полив и проведение регулярных уходов.

Научно-исследовательским и проектным организациям следует сосредоточиться на разработке и адаптации технологий для конкретных типов нарушений и уровней загрязнения. Это включает разработку составов травосмесей, рецептур почвогрунтов и мелиорантов. Активная работа по селекции и семеноводству позволит выделять и размножать наиболее устойчивые климатотипы местных пород и интродуцентов. Большой потенциал кроется во внедрении цифровых технологий, а именно в разработке систем дистанционного мониторинга на основе БПЛА и данных ДЗЗ для оценки состояния насаждений на больших территориях. Еще одной важной задачей является разработка и тиражирование типовых технологических карт и проектов рекультивации для наиболее распространенных типов нарушений.

Ключевые технологические рекомендации для всех участников процесса включают отказ от исключительно бульдозерной подготовки почвы на

сложных участках в пользу более гибкого экскаваторного способа. Массовый переход на использование семян с закрытой корневой системой является необходимым условием для повышения приживаемости. Крайне важно строго придерживаться научно обоснованных норм высева при аэропосеве и оптимальных схем посадки. Наконец, планирование и финансирование должны предусматривать полный цикл послепосадочных уходов вплоть до смыкания крон созданных насаждений.

В заключение, предложенные рекомендации носят комплексный и прикладной характер. Их успешная реализация возможна только при условии тесной координации между государством, бизнесом и наукой. Такой подход позволит перейти от формального выполнения требований к целенаправленному созданию устойчивых и продуктивных ландшафтов, что и является высшей целью рекультивации.

Заключение

Проведенное комплексное исследование позволило сформулировать научно обоснованные выводы и практические рекомендации по рекультивации нарушенных земель в условиях Российской Арктики. Анализ современной экологической ситуации, подкрепленный статистическими данными, подтверждает масштабность антропогенного воздействия на хрупкие приарктические экосистемы, характеризующиеся низким потенциалом самовосстановления. Это обуславливает необходимость применения системного, дифференцированного и технологически адаптированного подхода к восстановительным мероприятиям.

Ключевым выводом работы является доказательство тезиса о том, что эффективность рекультивации напрямую детерминирована комплексным учетом региональной специфики. Установлено, что выбор приоритетного направления рекультивации должен базироваться на всесторонней оценке природно-климатических условий (рельеф, состав грунтов, суровость климата), характера и степени техногенного нарушения, экономической целесообразности и целевого пост-рекультивационного назначения территории. В результате для каждого субъекта РФ

Арктической зоны были определены оптимальные векторы работ:

Для Мурманской области приоритет отдается санитарно-гигиеническому направлению, направленному на локализацию высокотоксичных объектов (хвостохранилища, места аварийных сбросов), с элементами лесохозяйственного и водохозяйственного обустройства территорий.

Для Архангельской области наиболее актуальным является многоцелевой (комбинированный) подход, интегрирующий лесовосстановительные, водоохранные мероприятия и работы по устранению негативного влияния на селитебные зоны.

Для Республики Карелия оптимален комбинированный подход с применением сельскохозяйственного, лесохозяйственного и санитарно-гигиенического направлений рекультивации.

Сравнительный анализ технологий искусственного лесовосстановления выявил высокую эффективность традиционного метода посадки стандартного посадочного материала (сеянцев и саженцев) с строгим соблюдением научно обоснованных схем размещения (например, 1 м в ряду при междурядье 5 м). При этом доказана перспективность массового перехода на использование посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС), что позволяет минимизировать посадочный стресс, исключить необходимость обязательного полива и значительно повысить приживаемость культур.

Для реабилитации труднодоступных территорий со сложным рельефом (отвалы, крутые склоны) высокий потенциал подтверждает метод аэропосева. Установлены оптимальные сроки его проведения (весенний период по снежному покрову или непосредственно после его стаяния) и научно обоснованные нормы высева семян хвойных пород первого класса качества (от 1,0 до 1,8 кг/га в зависимости от типа площадки и степени минерализации почвы).

Критически важным элементом успешной рекультивации является научно обоснованный подбор породного состава. На нетоксичных и слаботоксичных грунтах целесообразно создание продуктивных насаждений на основе основных лесобразующих пород (сосна обыкновенная, ель). На территориях со средним и высоким уровнем загрязнения приоритет

должен отдаваться видам-фитомелиорантам, обладающим толерантностью к токсикантам и способностью улучшать почвенные условия (ольха серая и черная, береза повислая, а также устойчивые интродуценты: тополь душистый, карагана древовидная).

Эффективность любых применяемых технологий находится в прямой зависимости от качества агротехнического исполнения на всех этапах: подготовки почвы (включая мелиорацию, внесение органических удобрений и мелиорантов), соблюдения оптимальных сроков проведения работ, а также от регулярного проведения послепосадочных уходов до момента смыкания крон созданных насаждений.

В качестве перспективных направлений для дальнейших исследований и практической реализации идентифицированы:

–Разработка и внедрение адаптивных систем лесохозяйственных мероприятий для различных категорий нарушенных земель.

–Широкое применение современных методов дистанционного мониторинга (БПЛА, ДЗЗ) для оценки эффективности рекультивации и состояния насаждений на обширных и труднодоступных территориях.

–Активное использование достижений лесной селекции и семеноводства для выделения и размножения наиболее устойчивых климатипов и видов.

–Разработка типовых технологических карт и регламентов для наиболее распространенных типов нарушений.

Таким образом, комплексная реализация предложенного дифференцированного подхода, основанного на комбинации традиционных и инновационных методов, адаптированных к специфике каждого региона, позволит перейти от формального выполнения восстановительных работ к целенаправленному созданию устойчивых, продуктивных и экологически ценных ландшафтов. Это является обязательным условием для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития стратегически важных арктических регионов Российской Федерации.

Список литературы

1. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор): [официальный сайт]. – URL: <https://rpn.gov.ru/> (дата обращения: 11.09.2025).
2. Создание искусственного растительного покрова техногенно нарушенных ландшафтов / М. А. Осинцева, В. А. Крюк, Е. А. Дюкова, Н. В. Бурова // Уголь. – 2023. – № S12(1175). – С. 56–62. – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-56-62.
3. Биологическая рекультивация нарушенных земель / Т. Г. Зеленская, А. А. Коровин, Е. Е. Степаненко [и др.]; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет». – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2022. – 186 с.
4. Шанин, С. А. Теория и практика регионального землепользования: подходы к пространственному развитию / С. А. Шанин // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2021. – № 7(76). – С. 46–51. – DOI: 10.33938/217-46.
5. Digging into Canadian soils: an introduction to soil science / M. Krzic, F. L. Walley, A. Diochon, M. C. Paré, R. E. Farrell (Eds.). – Pinawa, MB: Canadian Society of Soil Science, 2021. – URL: <https://www.saskoer.ca/soilscience/> (дата обращения: 11.09.2025).
6. Антропогенные почвы: учебник для вузов / М. И. Герасимова, М. Н. Строганова, Н. В. Можарова, Т. В. Прокофьева. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2025. – 264 с.
7. Иванов А. Н., Игнатьева М. Н., Юрак В. В., Пустохина Н. Г. Проблемы восстановления земель, нарушенных при разработке месторождений полезных ископаемых // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – № 4(60). – С. 218–227. – DOI: 10.21440/2307-2091-2020-4-218-227.
8. Kapelkina L. P., Bardina V. I., Gerasimov A. O. Ecological state assessment of urban soils by bioassay // Water, Air, & Soil Pollution. – 2022. – Vol. 233, № 1. – DOI: 10.1007/s11270-021-05475-8.
9. Капелькина Л. П., Бардина Т. В. Подходы к проведению исследований объектов накопленного экологического вреда // Биосфера. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 184–192. – DOI: 10.24855/biosfera.v15i3.827.
10. Соловицкий А. Н., Никулин Н. Ю. О рекультивации земель, нарушенных горными работами в Кузбассе, на основе применения прикладных геофизических технологий // Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2024. – № 1. – С. 111–116. – DOI: 10.31857/S0869780924010115.
11. Musurmankulov Z. S., Ergashev K. N., Ponomarenko E. A. Designing the recultivation and improvement of land damaged in Uzbekistan, problems and solutions // Vestnik IrGSHA. – 2025. – № 1(126). – С. 58–68. – DOI: 10.51215/1999-3765-2025-126-58-68.
12. Жуйков В. И., Софьина Е. В. Экономическое регулирование земельных отношений как основной принцип развития земельной политики России // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2022. – Т. 12, № 8-1. – С. 143–152. – DOI: 10.34670/AR.2022.33.32.016. – EDN UGLYMQ.
13. Соколов Д. А., Гуркова Е. А., Соколова Н. А. Литогенный потенциал почвообразования в техногенных ландшафтах угледобывающих месторождений Сибири // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 11. – С. 48–54. – DOI: 10.18412/1816-0395-2022-11-48-54.
14. Соколов Д. А., Гуркова Е. А., Соколова Н. А. Литогенный потенциал почвообразования в техногенных ландшафтах угледобывающих месторождений Сибири // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 11. – С. 48–54. – DOI: 10.18412/1816-0395-2022-11-48-54.
15. Трещевская Э. И., Тихонова Е. Н., Голядкина И. В., Трещевская С. В., Бобрешов К. В., Галстян Н. В. Защитные лесные полосы как составная часть мероприятий по биологической рекультивации техногенно нарушенных земель // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2025. – Вып. 252. – С. 22–39. – DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.22-39.
16. Филатова М. Ю., Крупская Л. Т., Леоненко А. В. Перспективы плантационного лесовыращивания на рекультивированных землях Дальневосточного федерального округа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2025. – № 252. – С. 155–169. – DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.155-169.
17. Первичное почвообразование на субстратах разного гранулометрического состава в посттехногенных экосистемах таёжной зоны / И. А. Лиханова, Е. Г. Кузнецова, Ю. В. Холопов [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2024. – № 1. – С. 122–130. – DOI: 10.25750/1995-4301-2024-1-122-130.
18. Заусаев В. К., Панкратова Н. Н. Интенсификация воспроизводства лесов как необходимое условие устойчивого развития лесного комплекса Дальнего Востока России // Лесохозяйственная информация. – 2023. – № 4. – С. 61–70. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.06.
19. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition / G. D. Gann, T. McDonald, B. Walder, J. Aronson, C. R. Nelson, J. Jonson, J. G. Hallett, C. Eisenberg et al. // Restoration Ecology. – 2019. – P. S1–S46.

20. Ермолаева Н. А., Савельев С. Н. К вопросу о рекультивации земель в промышленных зонах города Кемерово // Приднепровский научный вестник. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 3–5. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=mdfkjr> (дата обращения: 11.09.2025).
21. Исследование результатов работ по лесовосстановительной экологии на породных отвалах угольных карьеров в регионах Ангаро-Енисейской Сибири / И. В. Зеньков, Л. Х. Чинь, Ю. А. Анищенко [и др.] // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 10. – С. 45–51. – DOI: 10.18412/1816-0395-2022-10-45-51. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49492594> (дата обращения: 11.09.2025).
22. Antoninova N., Shubina L., Sobenin A., Usmanov A. Modern aspects of disturbed land reclamation // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 192. – Art. 03019. – DOI: 10.1051/e3sconf/202019203019.
23. Лесная рекультивация угольных отвалов с позиции сохранения фаунистического разнообразия Кузбасса / А. В. Ковалевский, И. В. Тарасова, Е. М. Лучникова [и др.] // Лесоведение. – 2021. – № 5. – С. 509–522. – DOI: 10.31857/S0024114821050065.
24. Кушнир Е. А., Недбаев И. С., Трещевская Э. И. Оценка состояния лесных насаждений и почвенного покрова на участках рекультивации Кингисеппского месторождения фосфоритов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2021. – № 1. – С. 68–80. – DOI: 10.21178/2079-6080.2021.1.68.
25. Кирдин В. Ф., Конончук В. В., Штырхунов В. Д., Тимошенко С. М. Восстановление плодородия почв, подвергшихся техногенным нарушениям // Аграрная Россия. – 2022. – № 2. – С. 8–12. – DOI: 10.30906/1999-5636-2022-2-8-12.
26. Лянгузова И. В. Средообразующая функция почвенно-растительного покрова сосновых лесов Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения // Ботанический журнал. – 2024. – Т. 109, № 10. – С. 984–1000. – DOI: 10.31857/S0006813624100031.
27. Shestakova T. A., Rogers B. M., Mackey B., Hugh S., Norman P., Kukavskaya E. A. Tracking ecosystem stability across boreal Siberia // Ecological Indicators. – 2024. – Vol. 169. – Art. 112841. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112841.
28. Лянгузова И. В. Средообразующая функция почвенно-растительного покрова сосновых лесов Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения // Ботанический журнал. – 2024. – Т. 109, № 10. – С. 984–1000. – DOI: 10.31857/S0006813624100031.
29. Tsoraeva E. N., Zaitseva Y. V. Reclamation of Disturbed Land in Russia: State of the Art // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 988, № 2. – Art. 022020. – DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022020.
30. Сурина Е. А., Демидова Н. А., Гоголева Л. Г. Успешность естественного лесовосстановления после применения различных видов рубок в Арктической зоне Архангельской области // Лесохозяйственная информация. – 2025. – № 2. – С. 59–69. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.2.04. – EDN KRCNQN.
31. Wu J., Liu Y., Liu F. et al. Comprehensive evaluation of land reclamation schemes in mining areas based on linguistic intuitionistic fuzzy group decision-making // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29. – P. 87380–87392. – DOI: 10.1007/s11356-022-20952-1.
32. Закономерности лесовосстановительных сукцессий на заброшенных сельскохозяйственных землях Башкирского Предуралья / П. С. Широких, Н. И. Федоров, И. Р. Туктамышев [и др.] // Экология. – 2023. – № 3. – С. 179–187. – DOI: 10.31857/S036705972303006X.

References

1. Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere prirodnopol'zovaniya (Rosprirodnadzor): [ofits. sayt]. – URL: <https://rpn.gov.ru/> (data obrashcheniya: 11.09.2025). [Federal Service for Supervision of Natural Resource Management (Rosprirodnadzor): official website].
2. Oprintseva, M. A., Kryuk, V. A., Dyukova, E. A., & Burova, N. V. (2023). Sozdanie iskusstvennogo rastitel'nogo pokrova tekhnogenno narushennykh landshaftov [Creation of artificial vegetation cover for technogenically disturbed landscapes]. *Ugol' [Coal]*, (S12(1175)), 56–62. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-S12-56-62>
3. Zelenckaya, T. G., Korovin, A. A., & Stepanenko, E. E. (2022). *Biologicheskaya rekul'tivatsiya narushennykh zemel'* [Biological reclamation of disturbed lands]. Stavropol'skiy gosudarstvennyy agrarniy universitet.
4. Shanin, S. A. (2021). Teoriya i praktika regional'nogo zemlepol'zovaniya: podkhody k prostranstvennomu razvitiyu [Theory and practice of regional land use: approaches to spatial development]. *Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyajstve [Economics, Labor, Management in Agriculture]*, (7(76)), 46–51. <https://doi.org/10.33938/217-46>
5. Krzic, M., Walley, F. L., Diochon, A., Paré, M. C., & Farrell, R. E. (Eds.). (2021). *Digging into Canadian soils: an introduction to soil science*. Canadian Society of Soil Science. <https://www.saskoer.ca/soilscience/> (data obrashcheniya: 11.09.2025).
6. Gerasimova, M. I., Stroganova, M. N., Mozharova, N. V., & Prokofeva, T. V. (2025). *Antropogennye pochvy* [Anthropogenic soils] (3rd ed.). Yurajt.

7. Ivanov, A. N., Ignat'eva, M. N., Yurak, V. V., & Pustokhina, N. G. (2020). Problemy vosstanovleniya zemel', narushennykh pri razrabotke mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh [Problems of land restoration disturbed by mining]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [News of the Ural State Mining University]*, (4(60)), 218–227. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-218-227>
8. Kapelkina, L. P., Bardina, V. I., & Gerasimov, A. O. (2022). Ecological state assessment of urban soils by bioassay. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05475-8>
9. Kapel'kina, L. P., & Bardina, T. V. (2023). Podkhody k provedeniyu issledovaniy ob"ektov nakoplennoego ekologicheskogo vreda [Approaches to research of objects of accumulated environmental damage]. *Biosfera [Biosphere]*, 15(3), 184–192. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i3.827>
10. Solovickij, A. N., & Nikulin, N. Yu. (2024). O rekul'tivatsii zemel', narushennykh gornymi rabotami v Kuzbasse, na osnove primeneniya prikladnykh geofizicheskikh tekhnologij [On the reclamation of lands disturbed by mining operations in Kuzbass based on applied geophysical technologies]. *Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya [Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology]*, (1), 111–116. <https://doi.org/10.31857/S0869780924010115>
11. Musurmankulov, Z. S., Ergashev, K. N., & Ponomarenko, E. A. (2025). Designing the recultivation and improvement of land damaged in Uzbekistan, problems and solutions. *Vestnik IrGSHA*, (1(126)), 58–68. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2025-126-58-68>
12. Zhujkov, V. I., & Sofina, E. V. (2022). Ekonomicheskoe regulirovanie zemel'nykh otnoshenij kak osnovnoj printsip razvitiya zemel'noj politiki Rossii [Economic regulation of land relations as a basic principle of the development of land policy in Russia]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra [Economics: Yesterday, Today, Tomorrow]*, 12(8-1), 143–152. <https://doi.org/10.34670/AR.2022.33.32.016>
13. Sokolov, D. A., Gurkova, E. A., & Sokolova, N. A. (2022). Litogennyj potentsial pochvoobrazovaniya v tekhnogennykh landshaftakh ugledobyvayushchikh mestorozhdenij Sibiri [Lithogenic potential of soil formation in technogenic landscapes of coal mining deposits in Siberia]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*, 26(11), 48–54. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-48-54>
14. Sokolov, D. A., Gurkova, E. A., & Sokolova, N. A. (2022). Litogennyj potentsial pochvoobrazovaniya v tekhnogennykh landshaftakh ugledobyvayushchikh mestorozhdenij Sibiri [Lithogenic potential of soil formation in technogenic landscapes of coal mining deposits in Siberia]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*, 26(11), 48–54. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-48-54>
15. Treshchevskaya, E. I., Tikhonova, E. N., Golyadkina, I. V., Treshchevskaya, S. V., Bobreshov, K. V., & Galshtyan, N. V. (2025). Zashchitnye lesnye polosy kak sostavnaya chast' meropriyatij po biologicheskoy rekul'tivatsii tekhnogenno narushennykh zemel' [Protective forest strips as an integral part of biological reclamation measures for technogenically disturbed lands]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii [News of the Saint Petersburg Forestry Technical Academy]*, (252), 22–39. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.252.22-39>
16. Filatova, M. Yu., Krupckaya, L. T., & Leonenko, A. V. (2025). Perspektivy plantatsionnogo lesovyrashchivaniya na rekul'tivirovannykh zemlyakh Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga [Prospects of plantation forest cultivation on reclaimed lands of the Far Eastern Federal District]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii [News of the Saint Petersburg Forestry Technical Academy]*, (252), 155–169. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.252.155-169>
17. Likhanova, I. A., Kuznecova, E. G., & Kholopov, Yu. V. (2024). Pervichnoe pochvoobrazovanie na substratakh raznogo granulometricheskogo sostava v posttekhnogennykh ekosistemakh tajozhnoj zony [Primary soil formation on substrates of different granulometric composition in post-technogenic ecosystems of the taiga zone]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]*, (1), 122–130. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-1-122-130>
18. Zausaev, V. K., & Pankratova, N. N. (2023). Intensifikatsiya vosproizvodstva lesov kak neobkhodimoe uslovie ustojchivogo razvitiya lesnogo kompleksa Dal'nego Vostoka Rossii [Intensification of forest reproduction as a necessary condition for the sustainable development of the forest complex of the Russian Far East]. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya [Forestry Information]*, (4), 61–70. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.06>
19. Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., et al. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, S1–S46.
20. Ermolaeva, N. A., & Savel'ev, S. N. (2019). K voprosu o rekul'tivatsii zemel' v promyshlennykh zonakh goroda Kemerovo [On the issue of land reclamation in industrial zones of the city of Kemerovo]. *Pridneprovskij nauchnyj vestnik [Dnieper Scientific Bulletin]*, 7(2), 3–5. <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mdfkjp> (data obrashcheniya: 11.09.2025).
21. Zen'kov, I. V., Chin', L. Kh., & Anishchenko, Yu. A. (2022). Issledovanie rezul'tatov rabot po lesovosstanovitel'noj ekologii na porodnykh otvalakh ugol'nykh kar'erov v regionakh Angaro-Enisejskoj Sibiri [Study of the results of

forest restoration ecology work on overburden dumps of coal quarries in the regions of Angara-Yenisei Siberia]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*, 26(10), 45–51. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-45-51>

22. Antoninova, N., Shubina, L., Sobenin, A., & Usmanov, A. (2020). Modern aspects of disturbed land reclamation. *E3S Web of Conferences*, 192, 03019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019203019>

23. Kovalevskij, A. V., Tarasova, I. V., & Luchnikova, E. M. (2021). Lesnaya rekul'tivatsiya ugol'nykh otvalov s pozitsii sokhraneniya faunisticheskogo raznoobraziya Kuzbassa [Forest reclamation of coal dumps from the perspective of preserving faunal diversity in Kuzbass]. *Lesovedenie [Forest Science]*, (5), 509–522. <https://doi.org/10.31857/S0024114821050065>

24. Kushnir, E. A., Nedbaev, I. S., & Treshchevskaya, E. I. (2021). Otsenka sostoyaniya lesnykh nasazhdenij i pochyennogo pokrova na uchastkakh rekul'tivatsii Kingiseppskogo mestorozhdeniya fosforitov [Assessment of the state of forest plantations and soil cover on reclaimed areas of the Kingisepp phosphate deposit]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva [Proceedings of the Saint Petersburg Research Institute of Forestry]*, (1), 68–80. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.1.68>

25. Kirdin, V. F., Kononchuk, V. V., Shtyrkhunov, V. D., & Timoshenko, S. M. (2022). Vosstanovlenie plodorodiya pochvy, podvergnushchaya tekhnogennym narusheniyam [Restoration of soil fertility subjected to technogenic disturbances]. *Agrarnaya Rossiya [Agrarian Russia]*, (2), 8–12. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2022-2-8-12>

26. Lyanguzova, I. V. (2024). Sredoobrazuyushchaya funktsiya pochvenno-rastitel'nogo pokrova sosnovykh lesov Kol'skogo poluoostrova v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya [Environment-forming function of soil and vegetation cover of pine forests of the Kola Peninsula under conditions of aerotechnogenic pollution]. *Botanicheskij zhurnal [Botanical Journal]*, 109(10), 984–1000. <https://doi.org/10.31857/S0006813624100031>

27. Shestakova, T. A., Rogers, B. M., Mackey, B., Hugh, S., Norman, P., & Kukavskaya, E. A. (2024). Tracking ecosystem stability across boreal Siberia. *Ecological Indicators*, 169, 112841. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112841>

28. Lyanguzova, I. V. (2024). Sredoobrazuyushchaya funktsiya pochvenno-rastitel'nogo pokrova sosnovykh lesov Kol'skogo poluoostrova v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya [Environment-forming function of soil and vegetation cover of pine forests of the Kola Peninsula under conditions of aerotechnogenic pollution]. *Botanicheskij zhurnal [Botanical Journal]*, 109(10), 984–1000. <https://doi.org/10.31857/S0006813624100031>

29. Tsoraeva, E. N., & Zaitseva, Y. V. (2022). Reclamation of Disturbed Land in Russia: State of the Art. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(2), 022020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022020>

30. Surina, E. A., Demidova, N. A., & Gogoleva, L. G. (2025). Uspeshnost' estestvennogo lesovosstanovleniya posle primeneniya razlichnykh vidov rubok v Arkticheskoy zone Arkhangel'skoj oblasti [Success of natural reforestation after various types of cuttings in the Arctic zone of the Arkhangelsk region]. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya [Forestry Information]*, (2), 59–69. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2025.2.04>

31. Wu, J., Liu, Y., Liu, F. et al. (2022). Comprehensive evaluation of land reclamation schemes in mining areas based on linguistic intuitionistic fuzzy group decision-making. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 87380–87392. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20952-1>

32. Shirokikh, P. S., Fedorov, N. I., & Tuktamyshev, I. R. (2023). Zakonomernosti lesovosstanovitel'nykh sukcesij na zabroshennykh sel'skokhozyajstvennykh zemlyakh Bashkirskogo Predural'ya [Patterns of reforestation successions on abandoned agricultural lands of the Bashkir Cis-Urals]. *Ekologiya [Ecology]*, (3), 179–187. <https://doi.org/10.31857/S036705972303006X>

Сведения об авторах

✉ Яковенко Наталия Владимировна – доктор географических наук, главный научный сотрудник дирекции НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com

Сурина Елена Анатольевна – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ул. Никитова, 13, г. Архангельск, Российская Федерация, 163062, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8159-8977>, e-mail: surina_ea@sevniilh-arh.ru

Information about the authors

✉ *Nataliya V. Yakovenko* – Dr. Sci. (Geogr.), Chief research officer of the division's Directorate of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com

Elena A. Surina – Cand. Sci. (Agric.), Leader Researcher, Scientific Research Department, Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8159-8977>, e-mail: surina_ea@sevniilh-arh.ru


– Для контактов /Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12>

УДК 630*85:631.3.02

Моделирование взаимодействия почвы с комбинированным орудием – ножевой каток и пара дисковых плугов

Леонид Д. Бухтояров¹ ✉, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Михаил Н. Лысыч¹, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Сергей В. Малюков¹, malyukovsergey@yandex.ru,  0000-0003-2098-154X

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

Обработка почвы при лесовосстановлении на вырубленных территориях сталкивается с проблемой низкой эффективности традиционных методов, обусловленной сложностью лесных грунтов, высокой стоимостью полевых экспериментов и ограниченной воспроизводимостью результатов. Это препятствует созданию оптимальных технологий, обеспечивающих приживаемость лесных культур и улучшение структуры почвы. Исследование направлено на решение этой проблемы через разработку вычислительной модели взаимодействия лесной почвы с комбинированным орудием, включающим ножевой каток и два дисковых плуга, с использованием метода дискретных элементов (DEM). Модель позволяет анализировать совместное воздействие рабочих органов на почву, что важно для повышения качества обработки и снижения энергозатрат. Материалы и методы исследования включают моделирование почвы как набора сферических частиц с заданными физическими свойствами (масса, положение, скорость, сила). Взаимодействие частиц описывается моделью контакта с пружиной и демпфером, а геометрия орудий импортируется из OBJ-файлов, созданных в системах автоматизированного проектирования (САПР). Программная реализация выполнена на языке Delphi. Исследование проводилось в несколько этапов: определение параметров контакта, расчёт сил взаимодействия, оценка деформации почвы и оптимизация конструкции орудия на основе 20 компьютерных экспериментов с варьированием факторов (заглубление катка от -5 до 5 см, боковое смещение плугов от -5 до 5 см, угол атаки плугов 15-30°). Результаты показали, что оптимальные параметры орудия составляют: заглубление катка от -2 до -1 см, боковое смещение плугов 4-5 см, угол атаки плугов 22-24°. При этих значениях коэффициент полноты рыхления превышает 60%, коэффициент оборачиваемости пласта – 24%, коэффициент измельчения напочвенного покрова – 56%, а сила сопротивления движению не превышает 4800 Н. Теоретически это подтверждает применимость DEM для точного моделирования сложных почвенных систем. Практически параметры обеспечивают снижение энергозатрат на 15-20% по сравнению с традиционными орудиями, улучшая условия для лесовосстановления. Ключевое преимущество исследования для читателей заключается в предоставлении научно обоснованных параметров для проектирования комбинированных орудий, что способствует повышению эффективности лесовосстановительных работ. Нерешённым остаётся вопрос адаптации модели к почвам с высоким содержанием корней, что требует дальнейших исследований с учётом дополнительных факторов, таких как влажность и плотность органических остатков.

Ключевые слова: *почвообрабатывающие орудия, ножевые катки, дисковые рабочие органы, комбинированные машины, рубки, тяговое сопротивление рабочих органов, метод дискретных элементов (DEM)*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Бухтояров, Л. Д. Моделирование взаимодействия почвы с комбинированным орудием – ножевой каток и пара дисковых плугов / Л. Д. Бухтояров, М. Н. Лысыч, С. В. Малуков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 186–200. – Библиогр.: с. 197–199 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12>


Поступила 03.04.2025 Пересмотрена 02.09.2025 Принята 15.09.2025 Опубликовано онлайн 25.09.2025

Article

Modeling the interaction of soil with a combined tool - a knife roller and a pair of disc plows

Leonid D. Bukhtoyarov¹✉, vgta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Mikhail N. Lysych¹, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Sergey V. Malyukov¹, malyukovsergey@yandex.ru,  0000-0003-2098-154X

¹ *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva street, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

Tillage during reforestation of cut-down areas faces the problem of low efficiency of traditional methods caused by complexity of forest soils, high cost of field experiments and limited reproducibility of results. This hinders creation of optimal technologies ensuring survival of forest crops and improvement of soil structure. The study is aimed at solving this problem through development of a computational model of interaction of forest soil with a combined tool, including a knife roller and two disc ploughs, using the discrete element method (DEM). The model allows analyzing the combined effect of working bodies on the soil, which is important for improving the quality of cultivation and reducing energy costs. Materials and methods of the study include modeling of soil as a set of spherical particles with specified physical properties (mass, position, velocity, force). Interaction of particles is described by a contact model with a spring and damper, and the geometry of the tools is imported from OBJ files created in computer-aided design (CAD) systems. The software implementation is implemented in Delphi. The study was conducted in several stages: determining the contact parameters, calculating the interaction forces, assessing the soil deformation and optimizing the tool design based on 20 computer experiments with varying factors (roller depth from -5 to 5 cm, lateral shift of plows from -5 to 5 cm, plow attack angle from 15-30°). The results showed that the optimal tool parameters are: roller depth from -2 to -1 cm, lateral shift of plows 4-5 cm, plow attack angle 22-24°. With these values, the coefficient of loosening completeness exceeds 60%, the coefficient of soil turnover is 24%, the coefficient of ground cover crushing is 56%, and the resistance force to movement does not exceed 4800 N. Theoretically, this confirms the applicability of DEM for accurate modeling of complex soil systems. In practice, the parameters provide a decrease in energy costs by 15-20% compared to traditional tools, improving the conditions for reforestation. The key benefit of the study for readers is the provision of scientifically substantiated parameters for the design of combined tools, which contributes to increasing the efficiency of reforestation work. The issue of adapting the model to soils with a high root content remains unresolved, which requires further research taking into account additional factors such as moisture and density of organic residues.

Keywords: *tillage implements, knife rollers, disc working bodies, combined machines, felling machines, traction resistance of working bodies, discrete element method (DEM)*

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Acknowledgement: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Bukhtoyarov L. D., Lysych M. N., Malyukov S. V. (2025). Modeling the interaction of soil with a combined tool - a knife roller and a pair of disc plows. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 186-200 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12>.

Received 03.04.2025 Revised 02.09.2025 Accepted 15.09.2025 Published online 25.09.2025

Введение

Современное лесное хозяйство сталкивается с необходимостью разработки эффективных технологий обработки почвы, особенно в контексте лесовосстановления на вырубленных территориях. Обработка почвы играет ключевую роль в обеспечении приживаемости лесных культур, улучшении структуры грунта и создании условий для роста новых насаждений. Современные технологии лесовосстановления зачастую предусматривают широкие диапазоны для выставления параметров орудий чтобы они обеспечили баланс качества обработки и энергозатрат в меняющихся почвенных условиях. В России и за рубежом [1, 2] ведутся работы по усовершенствованию и созданию новых эффективных комбинированных машин и агрегатов. При разработке и модернизации машин и агрегатов центральное место занимают повышение качества и уменьшение энергозатрат при обработке почвы [3, 4]. Для комбинации дисковых рабочих органов и глубокого рыхлителя исследования по обоснованию параметров взаимного расположения рабочих органов проводились Малюковым С.В. и др. (2023) [5, 6], что позволило определить энергетические и качественные показатели работы почвообрабатывающего агрегата.

Традиционные подходы к изучению взаимодействия почвы с орудиями, основанные на полевых экспериментах, сопряжены с высокими затратами времени, ресурсов и ограниченной воспроизводимостью результатов. В этом контексте численные методы, такие как метод дискретных элементов (DEM), становятся важным инструментом для анализа динамики почвенных процессов и оптимизации конструкции сельскохозяйственных и лесных машин.

Метод дискретных элементов зарекомендовал себя как мощный инструмент для моделирования дискретных систем, включая почву, которая

представляется как совокупность отдельных частиц с определёнными физическими свойствами. Обзор литературы, представленный в статье Aikins K.A. и др. (2023) [7], подчёркивает, что DEM превосходит методы конечных элементов (FEM), в моделировании разрушения почвы и динамики её частиц благодаря возможности детального анализа контактных сил и перемещений. При исследованиях почвы с помощью подходов DEM проводят калибровку параметров модели для достижения соответствия реальным условиям. Так, в работе Dongxu Yan. и др. (2022) [8] для песчаного суглинка применялась модель Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion (EPPA), что обеспечило ошибку менее 8,8% при верификации прочности на сдвиг, аналогично, Ma X. и др. (2024) [9] калибровали параметры для сухой почвы лесов, достигнув ошибки угла откоса в 2,44%. Эти исследования подчёркивают важность учёта, влажности и когезионных свойств почвы, что актуально и для лесных грунтов.

В обзоре Zhao H. и др. (2021) [10] отмечается, что DEM превосходит FEM и SPH в точности предсказания разрушения почвы, хотя требует значительных вычислительных ресурсов. При использовании метода дискретных элементов для задач описывающих моделирование взаимодействия почвы с комбинированным лесным орудием целесообразно различать три взаимосвязанных направления. Первое направление касается моделирования свойств почвы и её взаимодействия с лесными орудиями. Ahmad F. и др. (2020) [11] показывают применение DEM для анализа взаимодействия дисковых бороздоделателей с почвой, подчёркивая важность калибровки параметров для когезионных грунтов. Nelson R. M. и др. (2020) [12] использовали DEM для обоснования параметров отвального плуга, варьируя скорость, глубину и плотность грунта. Валидацию результатов выполнили с помощью полевых испы-

таний. Относительная ошибка между моделью и полевыми испытаниями составила менее 4,5%. Tienan Z. и др. (2023) [13] используя DEM, схему Hertz-Mindlin и тест на осадку илисто-глинистой почвы учли когезионные свойства грунта. Это направление показывает, как DEM может быть адаптирован для специфических типов почв и лесных орудий. Второе направление рассматривает анализ силовых характеристик и оптимизацию конструкции орудий. Jin Zhang и др. (2023) [14] применили DEM для оптимизации геометрических параметров ротационного ножа, с учетом его энергопотребления и степени дробления почвы, Yin L. и др. (2025) [15] оптимизировали дисковый рабочий орган машины для расчистки лугов путем моделирования её взаимодействия с травой в программном комплексе EDEM. Wu J. и др. (2022) [16] моделировали тяговые характеристики гусеничного движителя на мягком грунте, показывая применимость DEM для оценки сил сопротивления движению, что также актуально для анализа движения комбинированного лесного орудия. Третье направление посвящено изучению сложных систем, таких как почва-растение-машина. Zhao Z. и др. (2023) [17] методами DEM анализировали динамику почвы при ротационной обработке и выявили преимущества обратного вращения лезвий. В обзоре Walunj A. и др. (2023) [18] обобщает применение DEM к системам почва-растение-машина, включая обработку почвы и срезание растительности, что расширяет контекст применения метода в лесном хозяйстве. Zeng Z. и др. (2020) [19] также изучали взаимодействие почвы с кукурузными остатками, показав, как различные инструменты влияют на их смещение, что важно для анализа воздействия орудий на органические компоненты лесной почвы. Tian Y. (2024) и др. [20] исследуют подходы моделирования корней и растительных остатков, предлагая интеграцию DEM с машинным обучением.

Таким образом, актуальной задачей является фокусировка на разработке DEM-модели для комбинированного орудия, включающего ножевой каток и два дисковых плуга. Отличительным признаком планируемого нами исследования является интеграция нескольких рабочих органов в единую имитационную среду, что позволит оценить их совместное

воздействие на лесную почву. Такой подход перекликается с исследованиями по оптимизации конструкции машин, проведенному в работах и Jin Zhang и др. (2023) [14], где DEM использовался для анализа силовых характеристик и улучшения эффективности орудий. Кроме того, акцент на лесовосстановлении перекликается с исследованиями сложных систем почва-растение-машина Walunj A. I. и др. (2023) [18], где учитываются специфические условия почвы и её взаимодействие с техникой.

При разработке физико-математической модели классическим подходом принято считать использование принципов теорий машин и механизмов и механики контакта твердых тел. Именно на основе механика контакта и динамика Ньютона проведены исследования Nelson R.M. и др. (2020) [12]. Ahmad F. и др. (2020) [11] использовали цепочку действий, а именно, создавали трёхмерные модели в Pro/Engineer далее экспортировали их для симуляции в EDEM. Zhao Z. и др. (2023) [17] фокусировался на технологическом результате, оценивая степень дробления почвы и перемещения растительных остатков.

Анализ работ авторов демонстрирует, что DEM является современным методом для моделирования взаимодействия почвы с орудиями, а его эффективность зависит от точной калибровки параметров модели, учёта физико-механических свойств почвы и корректного представления геометрии разрабатываемых орудий. Следуя этим принципам, нами предлагается разработать комплексную вычислительную модель, которая объединяет ножевой каток и дисковые плуги в единой среде DEM. Теоретическая часть, представленная в статье, закладывает фундамент для этих расчётов, и её рассмотрение позволит раскрыть, как нами были адаптированы общие принципы DEM к специфике лесной почвы и комбинированного орудия.

Переходя к теоретической части, отметим, что она начинается с описания моделирования почвы как набора сферических частиц, каждая из которых характеризуется массой, положением, скоростью и силой. Взаимодействие частиц регулируется моделью контакта с пружиной и демпфером, что соответствует стандартным подходам DEM, описанным в работе Wu J. и др. (2022) [16]. Упругая сила,

вычисляемая по закону Гука, и демпфирующая сила, имитирующая вязкость почвы, формируют основу для анализа контактных взаимодействий и далее вводятся уравнения для расчёта сил и движения частиц. Перейдем к непосредственному рассмотрению новой DEM-симуляции комбинированной системы лесных орудий, объединяющей физические законы, геометрическое моделирование и вычислительные подходы для оценки поведения почвы под сложным механическим воздействием. В работе мы акцентируем внимание на работоспособность DEM-модели взаимодействия лесной почвы с комбинированным орудием (ножевой каток + пара дисковых плугов) с целью первичного обоснования диапазонов настроек параметров орудия не требующих специальных метрологических инструментов, используя только нанесенные на орудия шкалы расстояний и углов. Мы не заявляем прямых биологических эффектов таких как приживаемость культур, а рассматриваем только DEM-модель орудия и его взаимодействие с почвой. Модель опирается на общепринятый для DEM компромисс точности и вычислительной мощности и может быть реализована без использования суперкомпьютеров, на системах с современным шестиядерным процессором частотой 3,5 ГГц и более. Для практического выбора используется компромиссная логика – минимизация тягового сопротивления при одновременном обеспечении требуемых технологических показателей (рыхление, обрачиваемость пласта, разрушение напочвенного покрова).

Цель работы: разработка и демонстрация работоспособности DEM-модели для комбинированного орудия и первичное обоснование параметров на основе серии численных экспериментов.

Материалы и методы

Валидацию результатов вынесем за рамки исследования и сфокусируем работу на построении и демонстрации работоспособности DEM-модели. Почву моделируем как набор сферических частиц, каждая из которых характеризуется массой m , положением (x, y, z) скоростью (v_x, v_y, v_z) и силой (F_x, F_y, F_z) . Взаимодействие частиц регулируется моделью контакта с пружиной и демпфером.

Упругая сила (закон Гука) между двумя частицами противодействует перекрытию частиц и вычисляется по формуле

$$F_{el} = k_{zh}(D - r) \quad (1)$$

где k_{zh} – коэффициент жесткости, Н/м;

D – диаметр частицы, м;

r – расстояние между центрами частиц, м.

Демпфирующая сила (закон вязкого трения) имитирует вязкость почвы, рассеивая энергию и снижая накопление ошибок в результате высокочастотного взаимодействия частиц, вычисляется по формуле:

$$F_{damp} = -k_{damp} \cdot \Delta V \quad (2)$$

где k_{damp} – коэффициент демпфирования, Н/м;

ΔV – относительная скорость в направлении контакта, м;

Силу тяжести находим по известной формуле $F_z = -m \cdot g$. Знак минус указывает что сила тяжести направлена вниз по оси Z .

Трёхмерные модели орудий были спроектированы в САПР и сохранены в формате OBJ. В файле находятся данные вершин $B[i].x, B[i].y, B[i].z$, данные нормалей вершин $N[j].x, N[j].y, N[j].z$, и данные граней (каждая грань содержит три пары индексов, а именно индексы вершин и соответствующие им нормали) $F[k].v_1, F[k].v_2, F[k].v_3$ и $F[k].n_1, F[k].n_2, F[k].n_3$. Эти данные импортируются в соответствующие массивы программного кода и используются при расчете.

При моделировании контакта между орудиями и частицами почвы происходит обнаружение проникновения и расчет контактных сил.

Для каждой частицы расстояние до поверхности треугольника орудия вычисляется по уравнению плоскости

$$cA[i]x + cB[i]y + cC[i]z + cD[i] = 0 \quad (3)$$

где $cA[i], cB[i], cC[i]$ – коэффициенты, задающие нормаль к плоскости треугольника с индексом i (компоненты вектора нормали $\vec{N} = (cA[i], cB[i], cC[i])$); $cD[i]$ – свободный член, определяющий расстояние от начала координат до плоскости вдоль нормали;

(x, y, z) – координаты центра частиц почвы, для которой проверяется контакт.

Это уравнение плоскости задается для каждого треугольника, из которых состоит поверхность орудия (ножевого катка). Коэффициенты вычисляются на основе координат вершин треугольника из OBJ файла перед началом имитационного эксперимента.

Расстояние от центра частицы почвы до плоскости треугольника найдем по формуле:

$$C_o = \frac{|cA[i]x + cB[i]y + cC[i]z + cD[i]|}{\sqrt{cA[i]^2 + cB[i]^2 + cC[i]^2}}, \quad (4)$$

В числителе находится скалярное произведение вектора нормали и вектора от любой точки плоскости до центра частицы, плюс свободный член. В знаменателе – длина нормали (\vec{N} – нормализующий результат). В рассматриваемом случае $\vec{N} = 1$, то есть имеем нормализованную нормаль, поэтому формула (4) примет вид

$$C_o = cA[i]x + cB[i]y + cC[i]z + cD[i] \quad (5)$$

Величина C_o может быть как положительной так и отрицательной, в зависимости от того, с какой стороны плоскости находится частица почвы, поэтому для определения абсолютного расстояния берем её по модулю.

В таком случае условие контакта частицы почвы с орудием примет вид:

$$|C_o| < q \quad (6)$$

где $q=0,5D$, эквивалент радиусу частицы, выраженные через основной параметр D , м.

Таким образом, если расстояние от центра частицы до плоскости меньше половины её диаметра, то частица пересекает плоскость, что означает её контакт.

Движение частиц рассчитаем, используя явный метод Эйлера. Для определения положения используем формулу:

$$x = x + v_x \cdot dt + \frac{F_x}{m} \cdot \frac{dt^2}{2}, \quad (7)$$

Аналогично рассчитаем компоненты y и z .

В модели учтем когезионные свойства почвы. В реальной почве её частицы удерживаются вместе за счет физических взаимодействий друг с другом. В нашем случае примем допущение считать, что частицы считаются «связанными», если они находятся близко друг к другу, а разрыв этих связей будет имитировать разрушение структуры почвы под механическим воздействием орудия.

Для реализации такого подхода создадим массив Kle , который будет хранить информацию о связях между частицами. Для каждой частицы p в нем запишем индексы других частиц h , с которыми она связана «список соседей», но с учетом когезионных свойств. При инициализации связи между частицами определим на основе их расстояния. Если расстояние между центрами двух частиц r_{ph} меньше или равно пороговому значению, то они считаются связанными. Таким образом, условие связи примет вид:

$$r_{ph} = \sqrt{(x_p - x_h)^2 + (y_p - y_h)^2 + (z_p - z_h)^2} \leq D \cdot 1,05, \quad (8)$$

где (x_p, y_p, z_p) и (x_h, y_h, z_h) – координаты частиц p и h .

Порог 1,05 – коэффициент растяжения, который позволяет считать частицы связанными когезионными свойствами, когда они касаются друг друга или чуть дальше друг друга. То есть, он позволяет учитывать небольшую деформацию почвы без разрыва. Если происходит превышение этого порога, то связи разрываются и когезионные свойства между почвой больше не действуют. На каждом шаге имитационной модели проверяется расстояние между связанными частицами, записанными в массиве Kle и если $r_{ph} > D \cdot 1,05$, то связь удаляется из этого массива.

Введем в модель коэффициенты, которые будут оценивать деформацию почвы, вызванную орудием. Коэффициент переворачивания определим как долю частиц, которые изменили свое положение относительно исходной структуры (поднялись выше определенного уровня z) или потеряли связи с нижними слоями. Зададим ограничения в области работы орудия, для рассматриваемого случая

$$x \in [1.65, 1.9], y \in [0.3, 0.9], z > 0.2. \quad (9)$$

Частицы в указанной области почвы пометим как принадлежащие нижнему слою. Вычислим среднюю высоту r этих частиц по оси Z . Тогда частицы выше r маркируются как верхних слой. На каждом шаге имитации определяется новая высота для частиц в указанной области, и подсчитывается число частиц j , сменивших положение относительно r из нижнего слоя в верхний и наоборот. Таким образом, коэффициент оборачиваемости пласта примет вид

$$K_{ob} = \frac{j}{k} \cdot 100, \quad (10)$$

где k – общее число частиц в рассматриваемой области, шт.;

j – число частиц, изменивших положение, шт.

Введем коэффициент разрушения почвы K_{np} , который будет оценивать степень сохранения структуры верхнего слоя почвы ($z > 0,31$) в той же области ($x \in [1.65, 1.9]$, $y \in [0.3, 0.9]$). Значение 1 указывает на полное сохранение связей, а значение 0 на их полное разрушение. При инициализации частицы верхнего слоя $z > 0,31$ маркируем как $g=1$, а начальное число связей N_{GSKL0} в верхнем слое устанавливаем, как сумму из массива $Kle[i,0]$ для частиц с $g=1$. На каждом шаге пересчитываем число связей N_{GSKL1} для частиц верхнего слоя и рассчитываем коэффициент измельчения почвы по формуле

$$K_{np} = \left(1 - \frac{N_{GSKL1}}{N_{GSKL0}}\right) \cdot 100, \quad (11)$$

Таким образом, K_{np} представляет собой отношение текущего числа связей к начальному, демонстрирует, насколько орудие разрушает когезионную структуру верхнего слоя почвы.

Коэффициент полноты рыхления почвы рассчитаем по формуле

$$K_{np} = 100 - \frac{N_{GSKL1}}{N_{GSKL0}} \cdot 100, \quad (12)$$

Он показывает долю разрушенных связей в области действия орудия.

Сила сопротивления движению орудия F_x является ключевым параметром при проектировании и оптимизации. Она отражает энергию, необходимую для преодоления сопротивления почвы, и зависит от структуры почвы, геометрии орудия и скорости движения. В методе дискретных элементов DEM F_x моделируется как результат взаимодействия множества дискретных частиц почвы с поверхностью инструмента.

Сила сопротивления F_x определяется как проекция суммарной силы взаимодействия между частицами почвы и орудием на ось x , которая совпадает с направлением движения орудия. В реальных условиях эта сила складывается из сил трения между частицами и поверхностью орудия, сил сопротивления деформации почвы и сил, связанных с разрывом

когезионных связей. Мы используем подход методик DEM, когда эти взаимодействия упрощены до парного контакта между сферическими частицами и поверхностью орудия, представленного набором треугольных граней. Диаметр дискретных элементов почвы примем равным 35 мм, число дискретных элементов 80 000, шаг времени 0,0007 с, время моделирования 0,5607 с. При таких параметрах расчет одного вычислительного эксперимента на современном процессоре таком как Ryzen 5 5600X с частотой 3,7 ГГц займет порядка 14 минут.

При выполнении условия контакта орудия с частицей почвы $|C_0| < q$, силу сопротивления рассчитаем по формуле

$$F = k \cdot (q - |C_0|) \quad (13)$$

где k – коэффициент жесткости для силы, направленной вдоль нормали $cA[i]$, $cB[i]$, $cC[i]$

При нахождении силы F_x , затрачиваемой орудием необходимо учитывать суммирование вкладов для каждого контакта между частицами почвы и треугольниками, на которые разбита модель орудия, в этом случае формула примет вид

$$F_x = F_x + F \cdot cA[i] \quad (14)$$

где $cA[i]$ – компонента нормали по X .

$$cA[i] = (y_2 - y_1) \cdot (z_3 - z_1) - (z_2 - z_1) \cdot (y_3 - y_1)$$

$y_1, y_2, y_3, z_1, z_2, z_3$ – координаты соответствующих вершин треугольников, на которые разбито орудие.

Результаты и их обсуждение

Орудие представлено в модели в виде совокупности множества элементарных треугольных поверхностей (рисунок 1). Треугольники, образующие дисковые плуги, вращались под действием набегающей почвы относительно осей плугов. Режущий каток также вращался в соответствии с перемещением его ножей по поверхности почвы.

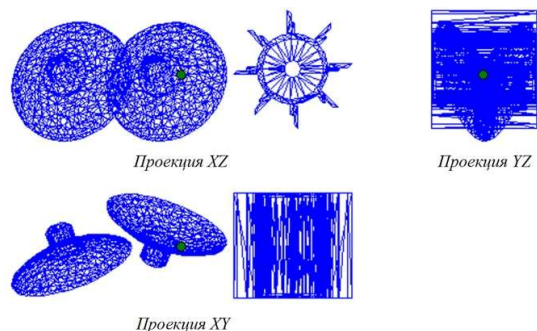


Рисунок 1. Проекция комбинированного орудия в модели

Figure 1. Projections of the combined weapon in the model°

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

На рисунке 2 приведен пример обработки почвы для первого набора параметров комбинированного орудия. На проекции XY отчетливо видны углубления, оставляемые ножами режущего катка, а также выраженная борозда после прохода комбинированного орудия.

При решении задачи оптимизации использовали следующие факторы:

a – величина заглубления режущего катка в почву (положительные значения a соответствуют заглублению цилиндрической поверхности катка ниже уровня почвы, в частности, в результате нагружения катка; отрицательные значения a соответствуют специально обеспечиваемому техническими средствами подъему цилиндрической поверхности катка над уровнем почвы); d – боковое смещение

нижних точек плугов относительно центра борозды (положительные значения d соответствуют раздвижению дисков вбок); φ – угол атаки дисковых плугов.

Критериями оптимизации являлись: K_{np} – коэффициент полноты рыхления почвы; $K_{об}$ – коэффициент оборачиваемости пласта; K_{rnp} – коэффициент измельчения напочвенного покрова; F_x – сила сопротивления движению орудия.

В процессе оптимизации фактор a варьировали в диапазоне $-5 \dots 5$ см, фактор d – в диапазоне $-5 \dots 5$ см, фактор φ – в диапазоне $15 \dots 30^\circ$.

Задачу оптимизации аналитически представим как:

$$\begin{cases} K_{np}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \\ K_{об}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \\ K_{rnp}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \\ F_x(a, d, \varphi) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow a^{opt}, d^{opt}, \varphi^{opt}. \quad (15)$$

Пример снимаемых данных для первого опыта по обработке почвы комбинированным орудием в компьютерном эксперименте показан на рисунке 2.

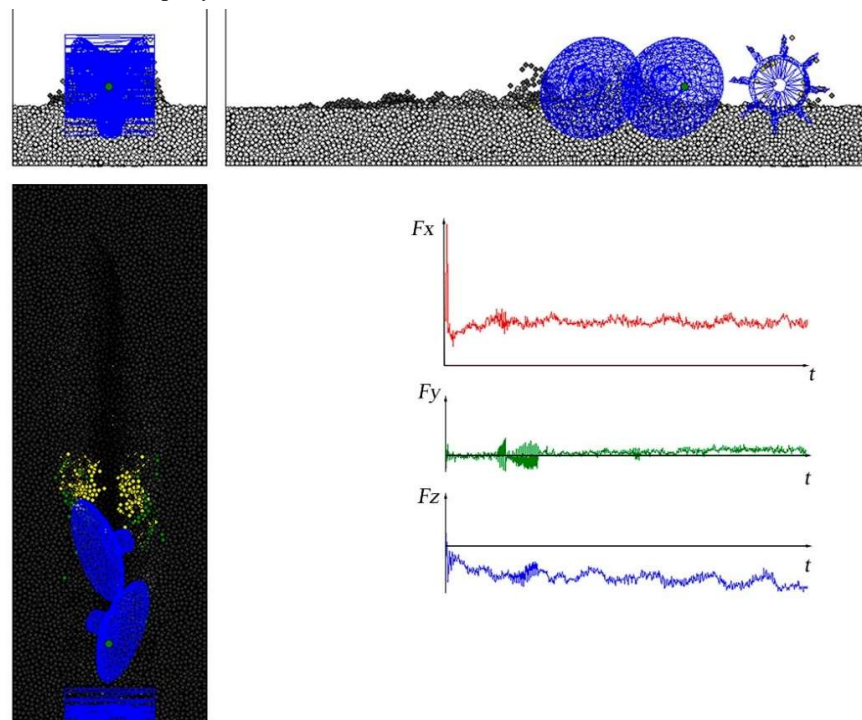


Рисунок 2. Пример снимаемых данных для первого опыта по обработке почвы комбинированным орудием в компьютерном эксперименте

Figure 2. An example of the data taken for the first experiment on soil cultivation with a combined tool in a computer experiment

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

На рисунке 3 приведены результаты отображения рабочих органов и почвы для всех двадцати компьютерных экспериментов.

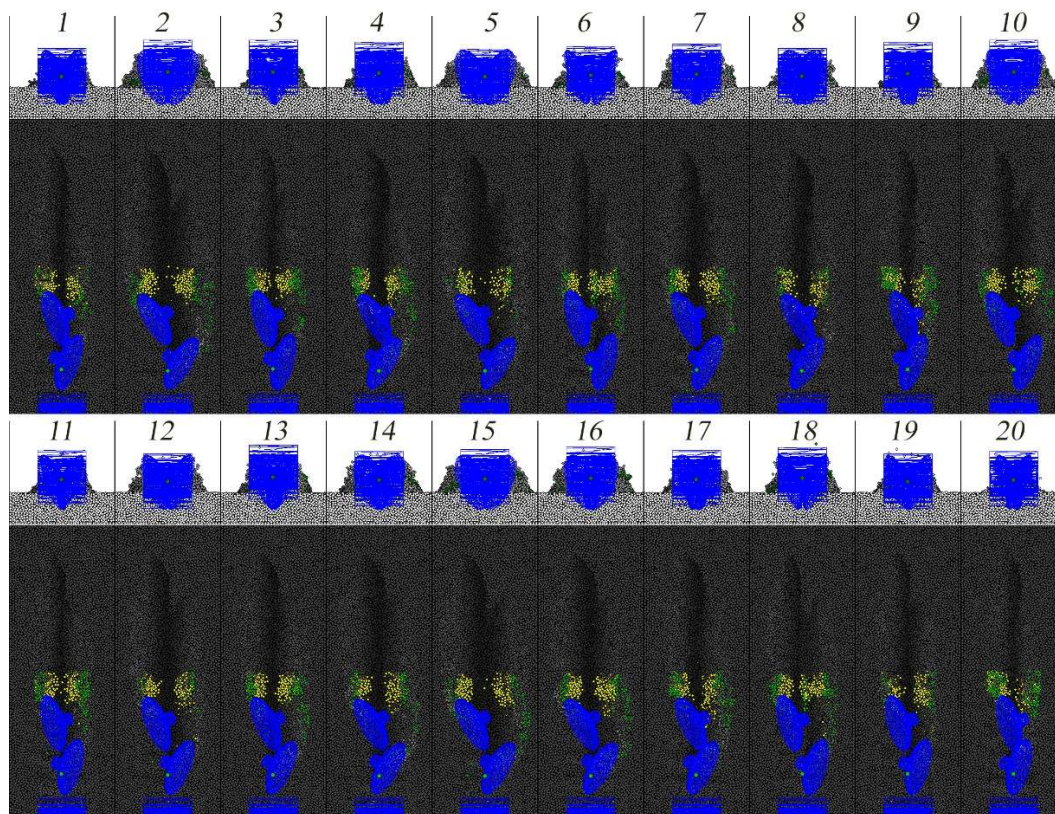


Рисунок 3. Вид спереди и сверху для двадцати проведённых компьютерных экспериментов

Figure 3. Front and top views of twenty computer experiments conducted

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

На рисунке 4 приведены результаты оптимизации – проекции областей факторного пространства (a , d , φ).

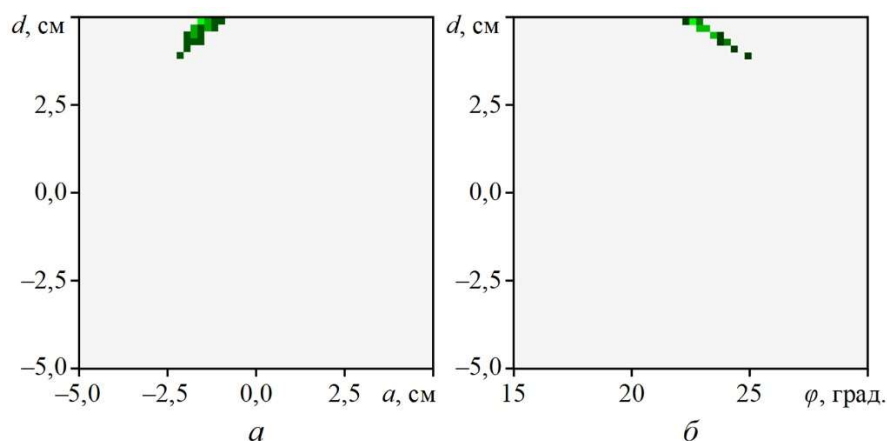


Рисунок 4. Проекция оптимальных областей факторного пространства (a , d , φ)

Figure 4. Projections of optimal regions of factor space (a , d , φ)

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

Входные и выходные данные для двадцати проведенных компьютерных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты компьютерных экспериментов для оптимизации параметров комбинированного орудия «режущий каток + 2 дисковых плуга»

Table 1

Results of computer experiments for optimization of parameters of combined tool «cutting roller + 2 disc plows»

Номер опыта Experience number	Заглуб- ление катка a , cm Roller depth a , cm	Боковая ди- станция между дис- ками d , см Lateral distance between discs d , cm	Угол уста- новки дис- ков φ , ° Disc installation angle φ , °	Коэффици- ент пол- ноты рых- ления K_{np} , % Co- efficient of complete- ness of loos- ening K_r , %	Коэффици- ент обра- чиваемости пласта $K_{об}$, % Formation turnover ra- tio K_{OB} , %	Коэффици- ент измель- чения напочв. по- крова $K_{мп}$, % Ground cover crush- ing coeffi- cient K_{mp} , %	Сила сопро- тивления движению орудия F_x , Н Resistance force to gun movement F_x , N
1	4,9	-2,8	19,8	54,94	30,55	52,82	4761
2	-4,9	5,0	29,9	79,93	21,73	57,50	5013
3	-5,0	0,4	15,1	44,90	22,99	46,15	2656
4	-2,5	-5,0	29,9	54,67	26,61	48,24	4127
5	5,0	4,6	29,9	82,66	27,56	56,60	6747
6	2,5	5,0	15,0	64,49	26,30	51,41	4262
7	-0,3	1,4	23,5	65,05	25,51	53,41	4288
8	4,7	-5,0	30,0	63,72	29,61	57,12	5715
9	-1,7	-5,0	19,5	45,81	24,72	45,10	3150
10	-4,8	5,0	20,9	71,42	23,15	55,76	3904
11	0,7	-0,6	15,0	45,83	21,89	48,03	3338
12	5,0	2,7	21,8	70,80	28,35	53,98	5610
13	-5,0	-1,6	24,3	51,98	24,57	49,74	3343
14	2,4	-0,2	30,0	69,10	27,87	51,14	5325

15	0,0	4,9	28,9	80,73	23,46	58,84	5524
16	-2,6	0,5	30,0	67,66	25,67	53,26	4572
17	1,2	-3,7	25,1	52,74	28,35	50,96	4131
18	-2,2	4,3	15,1	59,64	25,51	51,59	3383
19	5,0	0,9	15,5	59,29	29,92	52,43	4878
20	2,4	-4,9	15,0	48,56	23,46	45,86	3679

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Выводы

Для комбинированного орудия «режущий каток + 2 дисковых плуга» оптимальная величина заглубления катка минус 2 ... минус 1 см (то есть, цилиндрическая поверхность катка должна быть немного приподнята над напочвенным покровом), оптимальная величина бокового раздвижения дисковых плугов 4 ... 5 см (то есть, плуги должны быть немного смещены друг от друга вбок), оптимальный угол атаки дисковых плугов 22 ... 24°. При этом комбинированное орудие обеспечивает коэффициент полноты рыхления более 60 %, коэффициент обрачиваемости пласта более 24 %, коэффициент измельчения напочвенного покрова более 56 %, силу сопротивления движению орудия менее 4800 Н.

Разработанная нами DEM-модель, позволяет определить инженерные «окна» настроек комбинированно орудия «режущий каток + 2 дисковых плуга». Был использован многокритериальный подход с приоритетами, который позволяет установить баланс, при котором, не превышая тяговое ограничение F_x значения $K_{пр}$, $K_{об}$, $K_{гпр}$ были бы максимальны. Это демонстрирует компромиссный характер задачи. Выбор делается не по одному экстремуму, а по зоне параметров, где одновременно выполняются требования целевых функций. Выставляемые на орудии параметры (a , d , φ) не требуют специального инструмента и доступны к регулировки штатными средствами.

Список литературы

1. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. Development of combined tillage tool for melon cultivation. 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings. 2020; 19. DOI: 10.22616/ER-Dev.2020.19.TF175
2. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seed-lings. Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022. DOI: 10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741
3. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2021; 723:032061. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061
4. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation. E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechydro 2021". 2021; 04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>
5. Малюков С. В., Лысыч М. Н., Бухтояров Л. Д., Поздняков Е. В., Гнусов М. А., Шавков М. В., Петков А. Ф. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий. Лесотехнический журнал. 2023; 2(50):128-141. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525087>
6. Малюков С.В., Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н., Шавков М.В., Поздняков Е.В., Петков А.Ф. Метод динамики частиц: моделирование комбинированного почвообрабатывающего орудия, применяемого при лесовосстановлении и защите леса. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245:215-234. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.215-234. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54768956>
7. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B., Awuah E., Antille D.L., Jensen T.A., Desbiolles J.M.A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. Agriculture. 2023; 13: 541. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>
8. Yan, D.; Yu, J.; Wang, Y.; Zhou, L.; Tian, Y.; Zhang, N. Soil Particle Modeling and Parameter Calibration Based on Discrete Element Method. Agriculture. 2022; 12: 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091421>
9. Ma X., You Y., Yang D., Wang D., Hui Y., Li D., Wu H. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in Camellia Oleifera Forest. Agronomy. 2024; 14: 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>
10. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. Agriculture. 2021; 11: 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>
11. Ahmad F, Qiu B J, Ding Q S, Ding W M, Khan Z M, Shoiab M, et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil. Int J Agric & Biol Eng. 2020; 13(4): 103–110. Open Access at URL: <https://www.ijabe.org>
12. Nelson R. M., Changying Ji, Ian T. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation, Computers and Electronics in Agriculture. 2020; 179: 105848, ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105848>
13. Tienan Z, Zhou H, Ji J, Sun F, Qin Z. Parameter calibration of the discrete element simulation model for soaking paddy loam soil based on the slump test. PLoS ONE. 2023. 18(6): e0285428. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285428>
14. Zhang J., Xia, M., Chen W., Yuan D., Wu C., Zhu, J. Simulation Analysis and Experiments for Blade-Soil-Straw Interaction under Deep Ploughing Based on the Discrete Element Method. Agriculture. 2023; 13: 136. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010136>
15. Yin L., Guo A., Liu C., Guo M., Yang D., Gao X., Wu H. Design and Discrete Element (DEM) Simulation Analysis of Grassland Ecological Cleaning and Restoration Vehicle. Machines. 2025. 13: 114. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020114>

16. Wu J., Shen Y., Yang S., Feng Z. Simulation of Track-Soft Soil Interactions Using a Discrete Element Method. *Appl. Sci.* 2022; 12: 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052524>
17. Zhao Z., Wang D., Shang S., Hou J., He X., Gao Z., Xu N., Chang Z., Guo P., Zheng X. Analysis of *Cyperus esculentus*–Soil Dynamic Behavior during Rotary Tillage Based on Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023; 13: 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020358>
18. Walunj A., Chen Y., Tian Y., Zeng Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 2023. 13: 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>
19. Zeng Zhiwei, Ma Xu, Chen Ying, Qi Long. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research*. 2020. 197: 104505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104505>
20. Tian Y., Zeng Z., Xing Y. A Review of Discrete Element Method Applications in Soil–Plant Interactions: Challenges and Opportunities. *Agriculture*. 2024. 14: 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091486>

References

1. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. Development of combined tillage tool for melon cultivation. 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings. 2020;19. DOI: 10.22616/ER-Dev.2020.19.TF175
2. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seed-lings. Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022. DOI:10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741
3. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2021;723:032061. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061
4. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation. *E3S Web of Conferences*. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechhydro 2021". 2021;04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>.
5. Malyukov S. V., Lysych M. N., Buhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. Analiz diskovykh rabochih organov lesnykh pochvoobrabatyvayushchih orudij. [Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2023 2 (50): 128-141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525087>
6. Malyukov S. V., Bukhtoyarov L. D., Lysych M. N., Shavkov M. V., Pozdnyakov E. V., Petkov A. F. Metod dinamiki chastic: modelirovanie kombinirovannogo pochvoobrabatyvayushhego orudija, primenjaemogo pri lesovostanovlenii i zashhite lesa [Particle dynamics method: simulation of a combined tillage tool used in reforestation and forest protection]. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2023; 245: 215-234. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.215-234 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54768956>
7. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B., Awuah E., Antille D.L., Jensen T.A., Desbiolles J.M.A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. *Agriculture*. 2023; 13: 541. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>
8. Yan D., Yu J., Wang Y., Zhou L., Tian Y., Zhang N. Soil Particle Modeling and Parameter Calibration Based on Discrete Element Method. *Agriculture*. 2022; 12: 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091421>
9. Ma X., You Y., Yang D., Wang D., Hui Y., Li D., Wu H. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in *Camellia Oleifera* Forest. *Agronomy*. 2024; 14: 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>

10. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture*. 2021; 11: 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>
11. Ahmad F, Qiu B J, Ding Q S, Ding W M, Khan Z M, Shoiab M, et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil. *Int J Agric & Biol Eng*. 2020; 13(4): 103–110. Open Access at URL: <https://www.ijabe.org>
12. Nelson R. M., Changying Ji, Ian T. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation, *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 179: 105848, ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105848>
13. Tienan Z, Zhou H, Ji J, Sun F, Qin Z. Parameter calibration of the discrete element simulation model for soaking paddy loam soil based on the slump test. *PLoS ONE*. 2023. 18(6): e0285428. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285428>
14. Zhang J., Xia, M., Chen W., Yuan D., Wu C., Zhu, J. Simulation Analysis and Experiments for Blade-Soil-Straw Interaction under Deep Ploughing Based on the Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023; 13: 136. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010136>
15. Yin L., Guo A., Liu C., Guo M., Yang D., Gao X., Wu H. Design and Discrete Element (DEM) Simulation Analysis of Grassland Ecological Cleaning and Restoration Vehicle. *Machines*. 2025. 13: 114. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020114>
16. Wu J., Shen Y., Yang S., Feng Z. Simulation of Track-Soft Soil Interactions Using a Discrete Element Method. *Appl. Sci*. 2022; 12: 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052524>
17. Zhao Z., Wang D., Shang S., Hou J., He X., Gao Z., Xu N., Chang Z., Guo P., Zheng X. Analysis of *Cyperus esculentus*–Soil Dynamic Behavior during Rotary Tillage Based on Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023; 13: 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020358>
18. Walunj A., Chen Y., Tian Y., Zeng Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 2023. 13: 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>
19. Zeng Zhiwei, Ma Xu, Chen Ying, Qi Long. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research*. 2020. 197: 104505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104505>
20. Tian Y., Zeng Z., Xing Y. A Review of Discrete Element Method Applications in Soil–Plant Interactions: Challenges and Opportunities. *Agriculture*. 2024. 14: 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091486>

Сведения об авторах

✉ Бухтояров Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vgltax@yandex.ru

Лысыч Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru

Малюков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

Information about authors

✉ *Leonid D. Bukhtoyarov* – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru

Mikhail N. Lysych – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Sergey V. Malyukov – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author



Математическая модель и методика экспресс оценки напряженно-деформированного состояния рамы машины для ухода за лесными культурами

Леонид Д. Бухтояров¹ ✉, vglt-a-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821

Максим А. Гнусов¹, mgnusov@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Михаил Н. Лысыч¹, miklynea@yandex.ru, 0000-0002-3764-3873

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

При разработке лесных машин и орудий активно используют метод конечных элементов (МКЭ), для расчета влияния внешних нагрузок на прочностные и частотные характеристики конструкций. Как правило для этого используются дорогостоящие коммерческие пакеты программ ANSYS, LS-DYNA и др. На ранних стадиях проектирования проверка неудовлетворительных решений дорогостоящими пакетами программ не является целесообразной. Авторами разработан метод, экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) протестированный на конструкции кустореза, который работает прямо с геометрической моделью, выполненной в системе автоматизированного проектирования (САПР) и предоставляет возможность инженеру получать показатели прочности и жесткости, имеющие важное значение для технологического процесса. Предлагаемый метод включает в себя: импорт САПР модели в формате STL; вокселизацию и построение регулярной сетки HEX8 с управляемым шагом h ; задание условий Дирихле в зоне заделки и эквивалентной нагрузки Неймана через распределённое давление на нагруженных участках; сборку и решение линейно-упругой задачи; вычисление полей напряжений и эквивалентных напряжений Мизеса, а также оценку максимальных перемещений; экспорт результатов для последующего анализа. На примере балки кустореза продемонстрирована работа экспресс-методики. Установлено что при заданных нагрузках $F=3000$ Н максимальное напряжение у балки $L=500$, $40 \times 40 \times 3$ мм составило 268 МПа что превышает предел текучести стали – 220 МПа. Методика позволила отбраковать эту балку и заменить на новую, с параметрами $L=500$, $80 \times 80 \times 3$ мм, получены напряжения 58,3 МПа. Таким образом неудовлетворительный вариант был исключен ещё до тяжёлых мультифизических расчётов. Представленная методика предназначена для предварительной отбраковки слабых решений для снижения стоимости дальнейшей разработки лесных машин. Область применения – крупногабаритные механические узлы лесных машин и орудий.

Ключевые слова: кусторез, уход за лесными культурами, лесные машины, методика, математическое моделирование, метод конечных элементов (МКЭ), системы автоматизированного проектирования (САПР).

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.


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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Бухтояров, Л. Д. Математическая модель и методика экспресс оценки напряженно-деформированного состояния рамы машины для ухода за лесными культурами / Л. Д. Бухтояров, М. А. Гнусов, М. Н. Лысыч // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 201–216. – Библиогр.: с. 214–216 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/13>

Поступила 02.06.2025 Пересмотрена 09.09.2025 Принята 15.09.2025 Опубликовано онлайн 25.09.2025

Mathematical model and methodology of express assessment crisis-deformed state of the machine frame for the care of forest crops

Leonid D. Bukhtoyarov¹✉, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Maksim A. Gnusov¹, mgnusov@ya.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Mikhail N. Lysych¹, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

¹ FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva street, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

In the development of forestry machines and tools, the finite element method (FEM) is actively used to calculate the effect of external loads on the strength and frequency characteristics of structures. As a rule, expensive commercial software packages ANSYS, LS-DYNA, etc. are used for this. At the early stages of design, checking unsatisfactory solutions with complex software packages is not advisable. The authors have developed a method for expressly assessing the stress-strain state (SSS) of tested brush cutter designs, working directly with a geometric model created in a computer-aided design (CAD) system and allowing the engineer to obtain strength and rigidity indicators that are important for the technological process. The proposed method includes: import of a CAD model in STL format; voxelization and construction of a regular HEX8 grid with a controlled step h ; setting Dirichlet conditions in the embedment zone and the equivalent Neumann load through the distributed pressure on the loaded areas; assembly and solution of a linear elastic problem; calculation of stress fields and von Mises equivalent stresses, as well as assessment of maximum displacements; export of results for subsequent analysis. The express method is demonstrated using a brush cutter beam as an example. It was found that under the given loads $F=3000$ N, the maximum stress in the beam $L=500$, $40 \times 40 \times 3$ mm was 268 MPa, and the yield strength was 220 MPa. The method allows to reject this beam and replace it with a new one, with parameters $L=500$, $80 \times 80 \times 3$ mm, the resulting stress was 58.3 MPa. Thus, the unsatisfactory option was excluded even before the difficult multiphysical calculations. The presented method is intended for preliminary rejection of weak solutions to reduce the cost of further development of forestry machines. The scope of application is large-sized mechanical units of forestry machines and tools.

Keywords: *brush cutter, care of forest crops, forestry machines, methodology, mathematical modeling, finite element method (FEM), computer-aided design systems (CAD).*

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 declares no conflict of interest.

For citation: Bukhtoyarov L. D., Gnusov M. A., Lysych M. N. (2025) Mathematical model and methodology of express assessment crisis-deformed state of the machine frame for the care of forest crops. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 201-216 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/13>

Received 02.06.2025 **Revised** 09.09.2025 **Accepted** 15.09.2025 **Published online** 25.09.2025

Введение

Лесные машины работают в сложных условиях, постоянно испытывая знакопеременные нагрузки под воздействием внешних сил. Рассматривая такие машины как кусторезы следует выделить ключевые параметры, определяющие внешнее воздействие: – диаметр срезаемых ветвей d , скорость резания v , и скорость подачи u . Эти параметры непосредственно формируют нагрузку на рабочий орган и через него на несущие элементы рамы и узлы крепления. Аналогично можно выделить ключевые параметры для лесозаготовительных и транспортных лесных машин. Эксплуатационные ограничения диктуются местностью и технологией: работа на склонах и в колее, засорение щепой и грунтом, жёсткие требования по массе на вылете манипулятора. Для оператора критичны шум и вибрация, а для насаждений – минимизация повреждений подроста и почвы. Конструктивные решения должны выдерживать удары, перекосы от ветвей без потери технологических зазоров между лезвиями. На практике требуется быстро и достоверно оценивать напряжённо-деформированное состояние (НДС) рамы и узлов рабочего органа уже на эскизной стадии, когда ведётся перебор компоновок и сечений, и вовлечение тяжёлых коммерческих систем автоматизированного инженерного анализа (CAE) экономически нецелесообразно.

При проектировании лесных машин как правило начинают с их рамы или несущих узлов. В работе Chen Q. [1] для рамы лесной машины проведены верификация и валидация конечно-элементной модели, анализ чувствительности входных факторов, аппроксимация поверхности отклика (LSR/RBF). Приведенный подход позволил облегчить раму на 7,44% без потери жёсткости и частотных характеристик. Методично показано, как данные тензометрии и модальных испытаний калибруют расчётную модель [1]. Рабочие органы лесных машины могут быть установлены непосредственно на рамах и на манипуляторах. В работе Mergl [2] при рассмотрении харвестерной головки на трех разных конструкциях стрелы продемонстрирован перенос динамических нагрузок в статический прочностной расчёт. Сначала моделируют динамику валки дерева

и перенос ствола (MSC Adams), извлекают экстремальные нагрузки в шарнире подвеса, а затем применяют МКЭ-анализ (MSC Apex) к трём вариантам стрелы. Все решения выдерживают нагрузку, но оптимальным является вариант А; ключевые зоны концентрации – у сварных сопряжений «ухо–щека» и переходов к профилю [2]. Исследования ходовой части лесных машин – прочности лесных дорог под нагрузкой и манипуляторов – динамики крана на склонах были рассмотрены в работах Muşat E.C. [3] и Mergl [4]. Эти работы, с помощью методов конечных элементов (МКЭ), обосновывают поле допустимых режимов эксплуатации лесных машин и задают рамки для безопасных комбинаций вылет–масса–нагрузка. В работе Zhu B. [5] исследует привод лесопосадочной машины рассматривая маховик в трансмиссии, который работает как демпфер и способен сгладить пики мощности при резании грунта. При этом он моделирует почву представляя её как набор частиц – узлов без сетки, которые взаимодействуют между собой, опираясь на подход, реализованный в программном комплексе LS-DYNA, с последующей верификацией полученных результатов на прототипе [5]. После исследований рамы переходят к рабочим органам.

В работах Jia N. [6, 7] использован совмещённый FEM/BEM-подход при котором саму дисковую пилу рассматривают с помощью методов конечных элементов МКЭ (FEM), а внешнюю среду – методом граничных элементов (BEM), после чего стыкуют их на общей границе условиями совместности и равновесия. Такой подход позволил авторам прогнозировать частотные и пространственных характеристик дисковой пилы в процессе работы, а также провести оптимизацию конфигураций прорезей, что позволило снизить шум машины [6]. Оптимизация формы шумопонижающих прорезей ультратонких пил (NSGA-II) даёт $-2.4...-3.0$ дБ(А) при сохранении прочности [7]. В работе Takeyama K. [8] использован акустический конечно-элементный анализ (FEM), который позволяет выполнить анализ резонансных явлений в кожухе пилы и установить, что при увеличении диаметра пилы резонансные частоты смещаются вниз, а при рабочих скоростях уровни шума могут превышать 100 дБ(А). В работе Ding Y. [9] исследует динамическую устойчивость

полотна при распиле. Автор представил термоупруго-контактную модель, которую выполнил в программе LS-DYNA. С её помощью удалось установить влияние режимов обработки на температуру пилы, скорость, ускорение и вибрацию и получить регрессионные уравнения для инженерных оценок [9]. В работе Ji B. [10] для вала с диском и ступицей, строят МКЭ-модель и выполняют оптимизацию конструктивных параметров по поверхности отклика, чтобы увеличить разброс собственных частот и рабочей частоты, тем самым исключив резонанс. Результаты оптимизации ступицы увели опасную моду от рабочей частоты на 39% [10]. В работах Liu Y., Van Y. [11, 12] рассмотрен процесс ударного резания ветвей, разработана и верифицирована FEM-модель ударного резания, позволяющая анализировать распределения напряжений и деформаций, энергию разрушения и закономерности образования трещин у ветвей тополя при высоких нагрузках. Модель сопоставлена с полевыми измерениями силы резания, что подтвердило её точность и применимость для оптимизации параметров рабочих органов. Разработаны три варианта лезвий, которые заложены в механико-математическую модель сопротивления резанию методами численного моделирования FEM (ANSYS/LS-DYNA). Экспериментами на стенде определены энергия резания, сила, распространение стресс-волны, а также качество излома и раскалывания [11, 12]. В работе Krilek J. [13] исследована дисковая рубильная машина для переработки древесной биомассы. Методом конечных элементов (FEM) выполнен прочностной анализ ножа. Представлена методика, которая объединяет инженерные расчёты сил рубки, подбор геометрии узлов: нож, желоб/лоток, диск и CAE-верификацию (PTC Creo Parametric / Creo Simulate) для оценки напряжений, деформаций и пригодности инструментального материала при типовых режимах. Полученные результаты позволили обосновать выбор кинематики резания и геометрию кромок ножа [13]. В работе Sao J. [14] предложена эксцентрическая модель ротора на упругом основании, построенная на элементах балки и кольца на упругом основании. На базе уравнений Лагранжа, метода Рунге–Кутты и теории Флоке получены зоны неустойчивости частоты ро-

тора, которые сопоставлены с результатами стендовых и натурных испытаний. Установлены рекомендации для скоростных параметров машины, что позволило повысить эффективность резания [14]. Отдельно стоит выделить исследования объекта резания – древесины ветвей.

В работе Li X. [15] методами конечных элементов МКЭ, модального и гармонического анализа проведено исследование влияния изменения высоты свода на частотный спектр древесины. Показано, что малые своды (0 – 2 мм) сильнее влияют на основную частоту, тогда как большие (3 – 6 мм) – слабее, но заметно ограничивают формы колебаний и перераспределяют энергию в средневысокие частоты [15]. В работе Xuan Y. [16] исследует, как форма кроны дерева влияет на вибрационные характеристики. Для каждого типа кроны определены набор естественных частот, модальные формы и зависимость коэффициента демпфирования от частоты. Построены 3D-модели дерева на основе лазерного сканирования и проведён МКЭ-модальный анализ для интерпретации экспериментальных спектров. Установлено что у Y-образных деревьев частоты лучше согласованы между ветвями, а высокочастотные колебания дают более сильный отклик кроны, при этом демпфирование ниже и убывает с частотой [16].

В работах Драпалюка М.В., Бухтоярова Л.Д. и др. (2024), (2025) [17, 18, 19, 20], авторы последовательно исследовали роторы кусторезов, измеряли мощностные показатели, качество среза. Определяли динамику резания ветвей с учетом типа рабочего органа и частоты вращения чтобы оценить влияние на энергию резания и характер разрушения, однако не учитывали влияние режимов работы ротора на прочностные параметры конструкций [17, 18, 19, 20]. Предложенная методика логически продолжает этот цикл исследований, а результаты динамических моделей и экспериментальных замеров предыдущих работ использованы в качестве исходных нагрузок для оценки прочности.

Таким образом, для обоснования конструкций лесных машины широко применяют методы конечных элементов, и как правило, используют дорогостоящие программные комплексы (MSC, ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA), что не всегда обосновано на

ранних стадиях проектирования. Отсюда практический запрос – получить инженерно-достоверную оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих элементов быстро, прямо из геометрии узлов, выполненных в системах автоматизированного проектирования (САПР), без покупки дорогостоящих программных комплексов. Экспресс анализ НДС, в свою очередь, закрывает «узкое место» между эскизом и тяжелой мультифизикой, быстро отбраковывает неудовлетворительные решения, уточняет толщины, рёбра, узлы крепления и экономит время и средства перед этапом полной МКЭ валидации. Научная проблема заключается в отсутствии низкопорогового подхода к быстрой оценке прочности крупногабаритных механических узлов на ранней стадии проектирования без глубокого вовлечения в МКЭ-препроцессинг, дорогостоящих лицензий и зависимости от конкретных CAD-систем.

Материалы и методы

Разработаем методику экспресс оценки напряженно деформированного состояния конструкции рамы кустореза без использования дорогостоящих модулей FEM анализа. Методика предназначена для экспресс-оценки глобальной жёсткости и уровней напряжений на ранней стадии проектирования. Постановка – линейно-упругая, статическая, контакты, геометрическая и физическая нелинейности не рассматриваются. Геометрия импортируется в виде STL-оболочки и дискретизируется регулярной воксельной (HEX8) сеткой, из-за чего в зонах сложной кривизны, малых радиусов, отверстий и тонких стенок возможны ошибки аппроксимации «ступенчатость» границы. Точность управляется шагом h и допустимым числом элементов. Методика не предназначена для точной оценки локальных пиковых напряжений в концентраторах. Формат STL выбран по практическим причинам, он универсально экспортируется из большинства САПР, полигональная оболочка легко пересекается с равномерной кубической решёткой, что обеспечивает быструю вокселизацию. Известные недостатки, такие как ступенчатость границы, слабая передача малых радиусов приемлемы в заявленной цели так как методика направлена на быструю отбраковку неудовлетворительных вариантов по глобальным метрикам (жёсткость, уровень напряжений).

Первоначально необходимо задать следующие входные параметры:

$$\mathcal{P} = \{E, \nu, h, Fe_F, b_*, h_0\}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона; h – шаг регулярной воксельной сетки, м; Fe_F – результирующая сила и её единичное направление, Н; b_* – ширина нагруженной полосы на свободном торце, м; h_0 – допуск, определяющий толщину зоны сплошного заделывания, м.

Импортируем из САПР STL файл трехмерной геометрической модели. Далее будем рассматривать исходную модель как объединение множества всех треугольных граней:

$$\partial\Omega_{STL} = \bigcup_{k=1}^{N_{\Delta}} T_k, \quad (2)$$

где Ω_{STL} – объем твердого тела, м³; ∂ – оператор границы; $\partial\Omega_{STL}$ – граница, она же площадь сплошного изотропного тела, м²; k – индекс треугольника в STL; N_{Δ} – общее число треугольников в STL; T_k – текущий k – й треугольный элемент STL – сетки;

При рассмотрении физической модели примем, что материал является изотропным и линейно упругим. Модуль сдвига рассчитаем по формуле:

$$G = \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (3)$$

где G, μ – соответственно модуль сдвига, он же второй параметр Ламе, Па; E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона.

Модуль объемного сжатия рассчитаем по формуле:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}, \quad (4)$$

Первый параметр Ламе рассчитаем по формуле:

$$\lambda = \frac{E \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (5)$$

Так как рассматриваем конструкцию из углеродистой стали то значения примут вид:

$$E \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \nu \approx 0,3; G \approx 7,5 \cdot 10^{10} \text{ Па};$$

$$K \approx 1,6 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \lambda \approx 1,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}.$$

Для расчета напряжения используем закон Гука в тензорной форме:

$$\sigma = \lambda \text{tr}(\epsilon) I + 2\mu \epsilon, \quad (6)$$

где σ – тензор напряжений второго ранга, Па; $\text{tr}(\epsilon)$ – след тензора деформаций $\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$;

I – единичный тензор второго ранга; ε – тензор малых деформаций.

Матрица упругости имеет вид:

$$D = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где D – матрица упругости (6×6), Па; λ, μ – соответственно первый и второй параметр Ламе, Па.

Используем матрицы упругости в шестикомпонентной форме записи Войта. Векторы напряжений и деформаций имеют вид:

$$\begin{cases} \varepsilon^V = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy})^T \\ \sigma^V = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy})^T, \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma^V = D \varepsilon^V$$

где σ^V – вектор напряжений в записи Войта, Па; ε^V – вектор деформаций в записи Войта.

Чтобы перейти от матрицы упругости к матрице деформаций перемещения, аппроксимируем перемещения по формуле:

$$u(x) = \sum_{a=1}^8 N_a(\xi, \eta, \zeta) u_a, \quad (9)$$

где N_a – функция формы узла для HEX8; ξ, η, ζ – естественные координаты в элементе; $u_a = [u_{xa}, u_{ya}, u_{za}]^T$ – узловые перемещения, м

Далее перейдем к производным по x, y, z (Якобиан):

$$J = \sum_{a=1}^8 [x_a + y_a + z_a]^T \left[\frac{\partial N_a}{\partial \xi} + \frac{\partial N_a}{\partial \eta} + \frac{\partial N_a}{\partial \zeta} \right]^T, \quad (10)$$

где J – матрица Якоби (3×3), м; x_a, y_a, z_a – координаты узла a , м; $\frac{\partial N_a}{\partial \xi}, \frac{\partial N_a}{\partial \eta}, \frac{\partial N_a}{\partial \zeta}$ – пространственные производные форм, м;

Тогда преобразуем вектор деформации из системы (8) к виду:

$$\varepsilon^V = [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}]^T = \left[\frac{\partial u_x}{\partial x}, \frac{\partial u_y}{\partial y}, \frac{\partial u_z}{\partial z}, \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right]^T, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ – нормальные деформации; $\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$ – инженерные сдвиговые деформации; u_x, u_y, u_z – компоненты поля перемещений, м.

Матрица деформаций примет вид:

$$B = [B_1 B_2 \dots B_8], \quad B_a = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_a}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_a}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_a}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial N_a}{\partial z} & \frac{\partial N_a}{\partial y} \\ \frac{\partial N_a}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_a}{\partial x} \\ \frac{\partial N_a}{\partial y} & \frac{\partial N_a}{\partial x} & 0 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где B – матрица деформаций–перемещений (6×24), m^{-1} ; B_a – вклад узла a (6×3), m^{-1} ; $\partial N_a / \partial x_i$ – производные форм, m^{-1} .

Таким образом, задаём фундаментальные параметры материала и единственную конститутивную связь, связывающую поля перемещений с возникающими напряжениями во всех дальнейших вычислениях.

Поскольку методика рассматривает стационарную задачу линейной упругости то необходимо определить граничные и начальные условия. Из всего множества треугольников необходимо определить, какие из них заделаны жестко, какие свободны, а на какие приложена нагрузка.

$$\partial \Omega_{STL} = \Gamma_0 \cup \Gamma_F, \quad (13)$$

где $\partial \Omega_{STL}$ – граница, она же площадь сплошного изотропного тела, m^2 ; Γ_0 – участок границы, где тело заделано, m^2 ; Γ_F – участок границы, на который прикладывается нагрузка, m^2 ; $\Gamma_0 \cap \Gamma_F = \emptyset$ фиксированный торец и нагруженная область не перекрываются.

Для корректной постановки задачи описания математической моделью реальной схемы закрепления конструкции используем условия Дирихле:

$$u(x) = 0 \forall x \in \Gamma_0, \quad (14)$$

где $u(x)$ – вектор перемещений точки x , м; 0 – нулевой (трёхкомпонентный) вектор.

После того как условия Дирихле закрепили тело к опорам, необходимо описать, как на конструкцию действует внешняя нагрузка. Для этого применим условия Неймана – на нагруженной границе вместо перемещений зададим вектор удельных поверхностных сил, в виде потока напряжений по внешней нормали:

$$\sigma n = t^{ext}, \quad (15)$$

где σ – тензор напряжений второго ранга, Па; n – единичная внешняя нормаль к поверхности; t^{ext} – вектор поверхностной (удельной) силы, заданный на границе $t^{ext} = p e_F$, Па. $p = \frac{F}{A_F}$, p – эквивалентное поверхностное давление, Па; e_F – единичный вектор направления внешней силы; F – результирующая сила, которую должен дать интеграл нагрузки, Н; A_F – суммарная площадь всей нагруженной полосы, равная сумме площадей всех квадратных граней, на которые разнесено давление нагруженной полосы Γ_F , м².

Для того чтобы корректно задать нагрузку необходимо установить связь между давлением и суммарной силой:

$$p = \frac{F}{A_F}, \quad (16)$$

$$A_F = \iint_{\Gamma_F} dS, \quad (17)$$

где F – заданная результирующая сила, Н; A_F – площадь нагруженной полосы, м².

Для того чтобы сделать расчет физически корректным, необходимо чтобы заданная нагрузка и возникающие реакции совместно удовлетворяют глобальному равновесию, которое определим по формуле:

$$\int_{\Gamma_0} \sigma n dS + \int_{\Gamma_F} \sigma n dS = 0, \quad (18)$$

где dS – бесконечно малый элемент площади, м².

Для того чтобы определить исходное (ненагруженное) состояние, от которого начинается интегрирование по времени зададим начальные условия:

$$\begin{cases} u(x, 0) = 0 \\ \dot{u}(x, 0) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

где $u(x, 0)$ – первоначальное поле перемещений, м; $\dot{u}(x, 0)$ – первоначальное поле скоростей м/с; x – радиус – вектор точки в Ω м.

Поскольку рассматривается статическая задача, инерционные члены отсутствуют то начальные поля фиксируются как нулевые.

Таким образом узлы, удовлетворяющие условию $x \leq x_{min} + h_0$ маркируются, их степени свободы исключаются из глобальной матрицы жёсткости. Далее из всех граничных квадратов выбираются те, у которых нормаль почти параллельна продоль-

ной оси балки (осевой угол меньше допуска), а координаты центров удовлетворяют условию $y - y_c \leq b_*/2$, $x \geq x_{max} - h$ (свободный торец). При этом объединённая площадь этих граней даёт A_F . Для каждой квадратной грани сила $p A_{face}$ распределяется поровну на четыре вершины; вектор силы каждой вершины равен $\frac{p A_{face}}{4} e_F$. Такой подход описывает всестороннее построение задачи, а именно: где и как тело закреплено (условия Дирихле); где в каком виде и с какой интенсивностью прикладывается нагрузка (условия Неймана); какие начальные состояния приняты (нулевые, поскольку выполнена статическая постановка задачи).

Эти условия делают систему «уравнения равновесия + конститутивная связь» разрешимой в единичном случае и при этом численно устойчивой. На следующем шаге необходимо перейти от сплошной области Ω к её воксельной дискретизации Ω_h .

Для этого необходимо проверить точки на принадлежность области модели. При вокселизации целесообразно, чтобы индексы начинались с нуля поэтому удобно использовать минимальные координаты самой трехмерной модели (координаты нижнего, левого угла ограничивающего параллелепипеда). При такой постановке задачи, точка отсчета решетки и модели будут совпадать. Координаты точек решетки найдем по формуле:

$$x_{ijk} = (x_{min} + i h, y_{min} + j h, z_{min} + k h), \quad (20)$$

где x_{ijk} – центр вокселя с индексами (i, j, k) , м; $x_{min}, y_{min}, z_{min}$ – минимальные координаты STL – модели, м; i, j, k – целочисленные индексы сетки.

Каждый занятый куб образует гексаэдр HEX8 $V^{(e)} = [x_i, x_i + h] \times [y_j, y_j + h] \times [z_k, z_k + h]$, (21)

где $V^{(e)}$ – объём e – го HEX8 – элемента, м³; (x_i, y_j, z_k) – координаты углов куба, м.

Тогда дискретную область можно описать системой:

$$\begin{cases} \Omega_h = \bigcup_{e=1}^{N_e} V^{(e)}, \\ h = \max_e \text{diam } V^{(e)}. \end{cases} \quad (22)$$

где Ω_h – вокселизированная аппроксимация Ω , м³; N_e – общее число элементов; $\text{diam } V^{(e)}$ – диагональ куба $= \sqrt{3} h$, м.

Эквивалентное напряжение Мизеса рассчитаем по формуле:

$$\sigma_{eq}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2), \quad (23)$$

где σ_{eq} – напряжение Мизеса, Па; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ – нормальные напряжения, Па; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – касательные напряжения, Па.

Таким образом вокселизация переводит STL – геометрию в структурированную конечно – элементную сетку. Шаг h управляет компромиссом между точностью расчета и его производительностью. Полученная область Ω_h служит основой для

сборки глобальной матрицы, наложения граничных условий и решения уравнений упругости.

На рисунке 1 показана схема, по которой работает методика экспресс оценки напряженно – деформированного состояния конструкции рамы кустореза. Получив базовую математическую модель – формулы (1) ... (23), подставляем константы и геометрию (B–C), дискретизируем непрерывную задачу методом конечных элементов (D–K), решаем алгебраическую систему, полученную из тех же уравнений равновесия (L–S), вычисляем деформации, напряжения Мизеса по тем же формулам, которые следуют из исходной модели (T–W), сводим и экспортируем результаты (X).

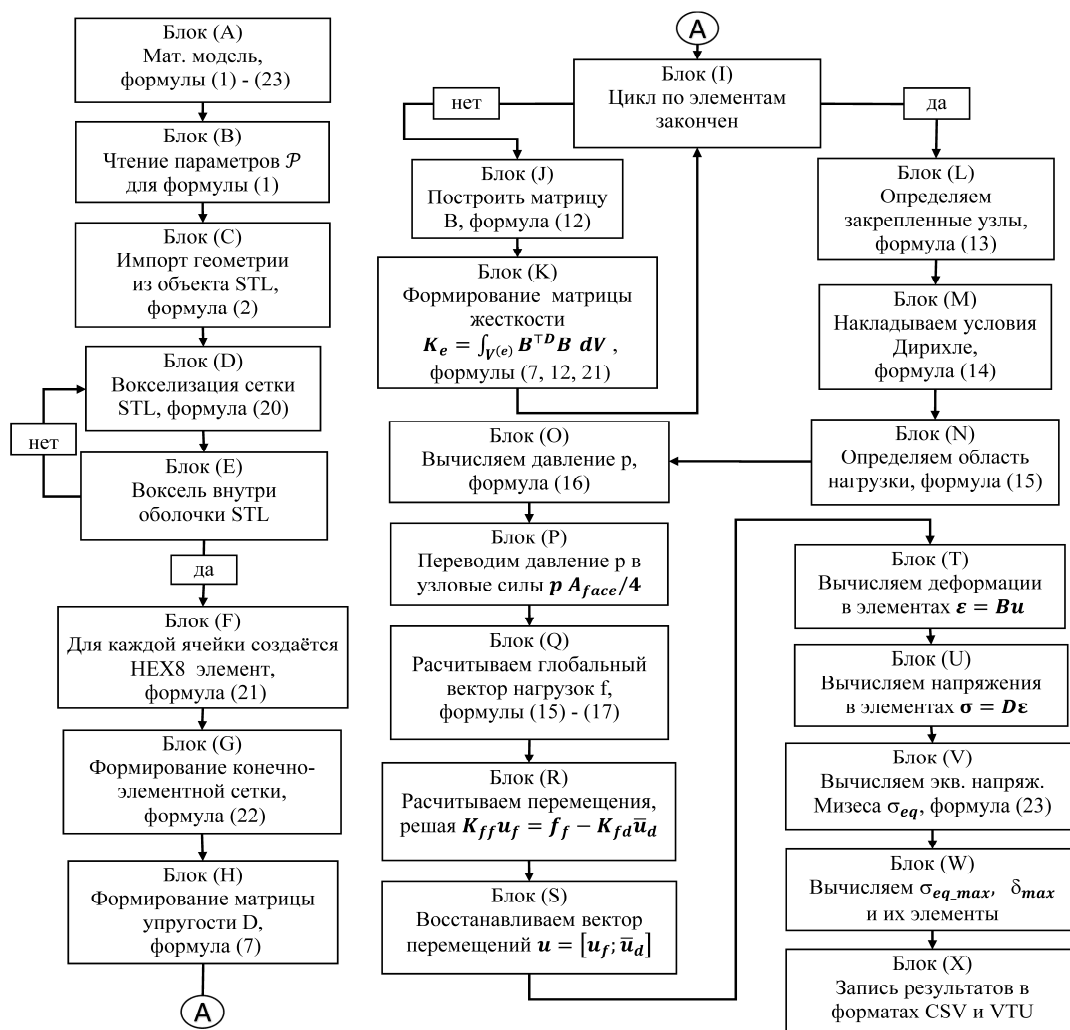


Рисунок 1. Схема работы методики экспресс оценки напряженно – деформированного состояния конструкции

Источник: собственная методика авторов

Figure 1. Scheme of operation of the express assessment method – deformed forms of the state

Source: authors' own methodology

Для простоты реализации и проверки методики рассмотрим опорную балку кустореза. Она неподвижно закреплена одним концом, а на другой конец действуют нагрузки от сил резания между ротором и древесно-кустарниковой растительностью.

Результаты и их обсуждение

В первом приближении рассмотрим только балку, без остальной конструкции кустореза. Скорость расчета методики в Python для балки составила 2 минуты, для кустореза 6 минут на современном процессоре Ryzen 5 5600X с частотой 3,7 ГГц. Балку спроектируем в САПР и сохраним в STL формате. Данный формат удобен тем, что балка в нем представляет собой набор непересекающихся плоских треугольных граней. Такой полигонизированный контур пересекается с равномерной кубической решёткой, и чтобы построить воксельную модель, достаточно для каждого вокселя проверить, пересе-

кается ли его объём с какой – нибудь гранью. Рассмотрим объект – балку длиной $L=500$ мм и сечением $40 \times 40 \times 3$ мм. Рассчитаем напряжения и перемещения балки под действием нагрузки 3000 Н на её конце с помощью МКЭ коммерческой САПР и разработанной авторами методики, рисунок 2.

Для наглядности на балке выберем три точки расположенные по середине сечения верхней грани в её начале, центре и конце, аналогично поступим и для боковой грани. Проведем зондирование значений напряжений и перемещений в выбранных точках и сведем полученные результаты в таблицу 1. Начало системы координат балки расположено в левом нижнем углу, зная сечение $40 \times 40 \times 3$ мм и длину балки 500 мм по представленным в таблице координатам и палитре рисунка 2 легко определить положение точек на балке.

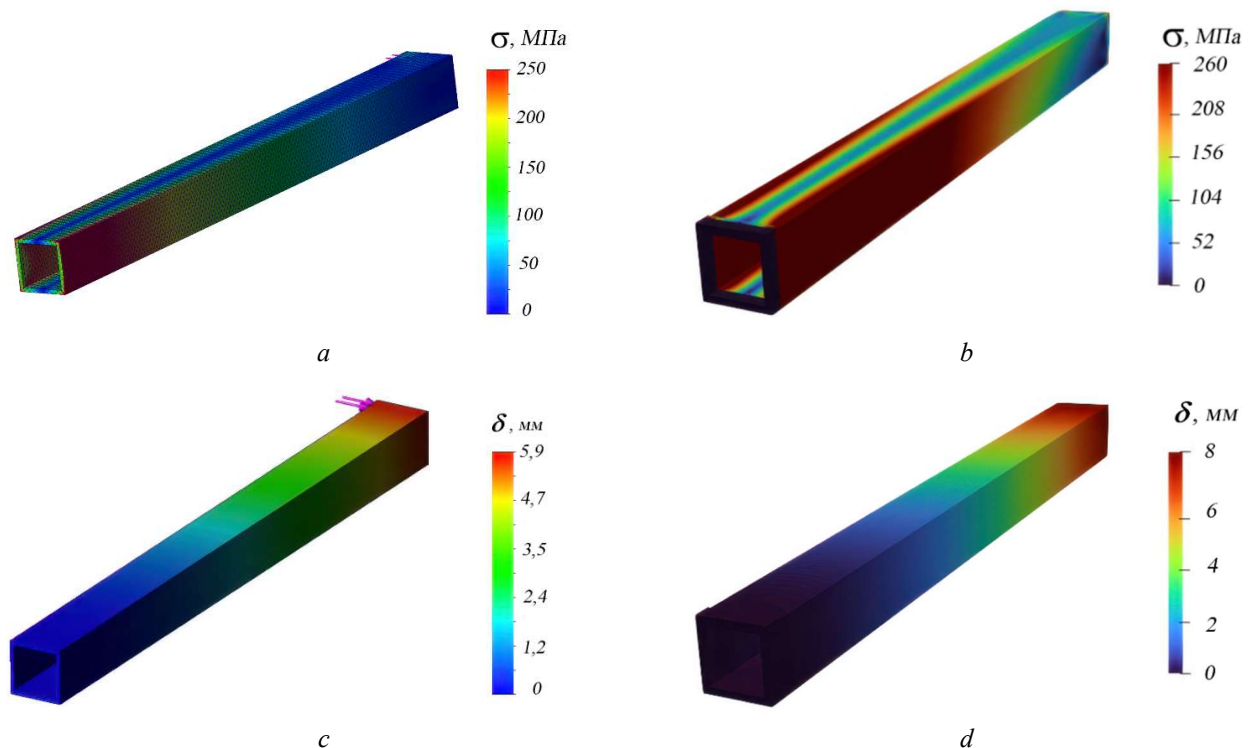


Рисунок 2. Результаты расчета напряжений и перемещений балки $40 \times 40 \times 3$ мм под нагрузкой 3000 Н на её конце $L=500$ мм: *a* – напряжения по САПР, *b* – напряжения по методике, *c* – перемещения по САПР, *d* – перемещения по методике

Источник: собственный расчет авторов

Figure 2. Results of calculation of stresses and transferable beams $40 \times 40 \times 3$ mm for installation of 3000 N at its end $L=500$ mm: *a* – stress to CAD, *b* – stress to the method, *c* – displacement to CAD, *d* – displacement to the method

Source: authors' own calculations

Таблица 1

Результаты расчета опорной балки кустореза

Table 1

Results of calculation of the support beam of the brush cutter

№ точки points	Координаты Coordinates			Напряжения Stresses		Δ σ, % Δ σ, %	Перемещения Displacements		Δ δ, % Δ δ, %
	X , мм X, mm	Y , мм Y , mm	Z , мм Z , mm	σ _{ко} м, МПа σ _{co} m, МПа	σ _м ет, МПа σ _m et, МПа		δ _{ком} , мм δ _{com} , mm	δ _м ет, мм δ _m et, mm	
Верхняя горизонтальная грань балки Upper horizontal edge of the beam									
1	40	20	50	27	31	15	0,1	0,106	7
2	40	20	250	27	30	11	1,8	2,6	44
3	40	20	495	37	29	28	5,7	8,4	48
Боковая вертикальная грань балки Lateral vertical face of the beam									
4	20	40	50	245	268	9	0,1	0,13	35
5	20	40	250	144	187	30	1,9	2,6	37
6	20	40	495	22	26	18	5,9	8,3	41

Источник: собственный расчет авторов

Source: authors' own calculations

Для проверки адекватности работы математической модели в системах автоматизированного проектирования и разработанной методики используем классические уравнения из теории сопротивления материалов.

Так как балка представляет собой тонкостенную квадратную трубу, найдем момент инерции её сечения по формуле:

$$I_z = \frac{b_{\text{нар}}^4 - b_{\text{вн}}^4}{12} = \frac{40^4 - 34^4}{12} = 1,01972 \cdot 10^5 \text{ мм}^4, \quad (24)$$

где I_z – момент инерции относительно оси изгиба, мм⁴; $b_{\text{нар}}$ – наружный размер профиля, мм; $b_{\text{вн}}$ – внутренний размер, мм.

Расстояние от оси до крайней точки сечения найдем по формуле:

$$c = \frac{b_{\text{нар}}}{2} = 20 \text{ мм}, \quad (25)$$

Максимальный изгибающий момент определим по формуле:

$$M_{\text{max}} = P \cdot L = 3\,000 \cdot 500 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}, \quad (26)$$

где P – сила, сосредоточенная на конце балки, Н; L – длина балки, мм.

В этом случае максимальное напряжение изгиба определим по формуле:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}} \cdot c}{I_z} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 20}{1,01972 \cdot 10^5} \approx 294 \text{ МПа}, \quad (27)$$

Прогиб свободного конца балки найдем по формуле:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_z} = \frac{3\,000 \cdot 500^3}{3 \cdot 210\,000 \cdot 1,01972 \cdot 10^5} \approx 5,83 \text{ мм}, \quad (28)$$

где E – модуль Юнга, для стали, МПа

Как следует из таблицы 1 разница между разработанной методикой и коммерческим САПР по напряжению находится в пределах 9...30 %, а по перемещениям в пределах 7...48 %. В тоже время разница напряжений на конце балки между коммерческим САПР и классической теорией сопротивления материалов составляет 20%, а по перемещению 2%, при этом коммерческий САПР предназначен для широкого круга задач, в том числе точной механики.

Значительное отличие по перемещению может вызывать озабоченность, однако, даже наибольшая разница в 48% по факту представляет собой перемещение конца балки на 3 мм при её длине 0,5 м что перекрывается технологическими допусками лесных орудий. Полученная разница в напряжениях порядка 30% также позволяет отбраковать грубые решения на что и направленная разрабатываемая методика. Указанные, в начале работы, ограничения методики, в итоге сказались на полученных результатах, и было бы странно если силами небольшого коллектива мы обесценили труд зарубежных компаний.

Общий вид спроектированного кустореза показан на рисунке 3. К навеске 1 крепится рама 2, на которой установлены балки 3. На концах каждой балки через плиту 4 закреплен гидромотор 6 который приводит во вращение ротор с ножами 5.

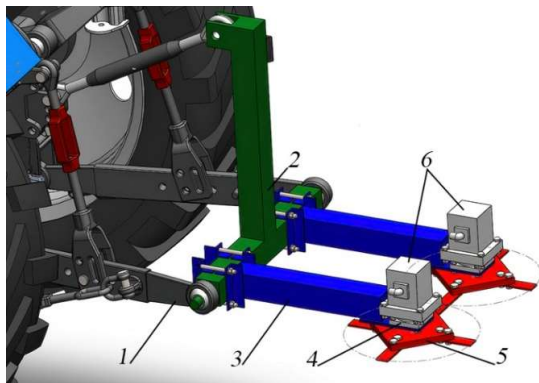


Рисунок 3. Общий вид роторного кустореза на навеске трактора
Источник: Собственная 3D модель авторов

Figure 3. General view of a rotary brush cutter mounted on a tractor

Source: Authors' own 3D model

Рассчитаем напряжения и перемещения рабочего органа под действием нагрузки на ноже с помощью МКЭ САПР и разработанной методики. В качестве расчетной нагрузки примем значение 3000 Н. Место крепления орудия – левый торец балки 3.

Проведем зондирование значений напряжений и перемещений в выбранных точках кустореза, аналогично ранее рассмотренной балке, дополнительно добавив наиболее удаленную точку на кромке ножа. Начало системы координат кустореза расположено в левом нижнем углу. Обращаем внимание, что рабочая зона ротора кустореза составляет 410 мм, поэтому продольная центральная плоскость ось XOZ расположена на расстоянии 205 мм, вычитая из него половину сечения профиля балки 80x80 мм получим координату боковой грани – 165 мм. Ось ротора находится от торца балки на расстоянии 80 мм. Нож имеет толщину 5 мм, далее идет маховик, вылет вала, пластина и балка, в результате верхняя грань находится на высоте 205 мм. Результаты расчета показаны на рисунке 4, и сведены в таблице 2.

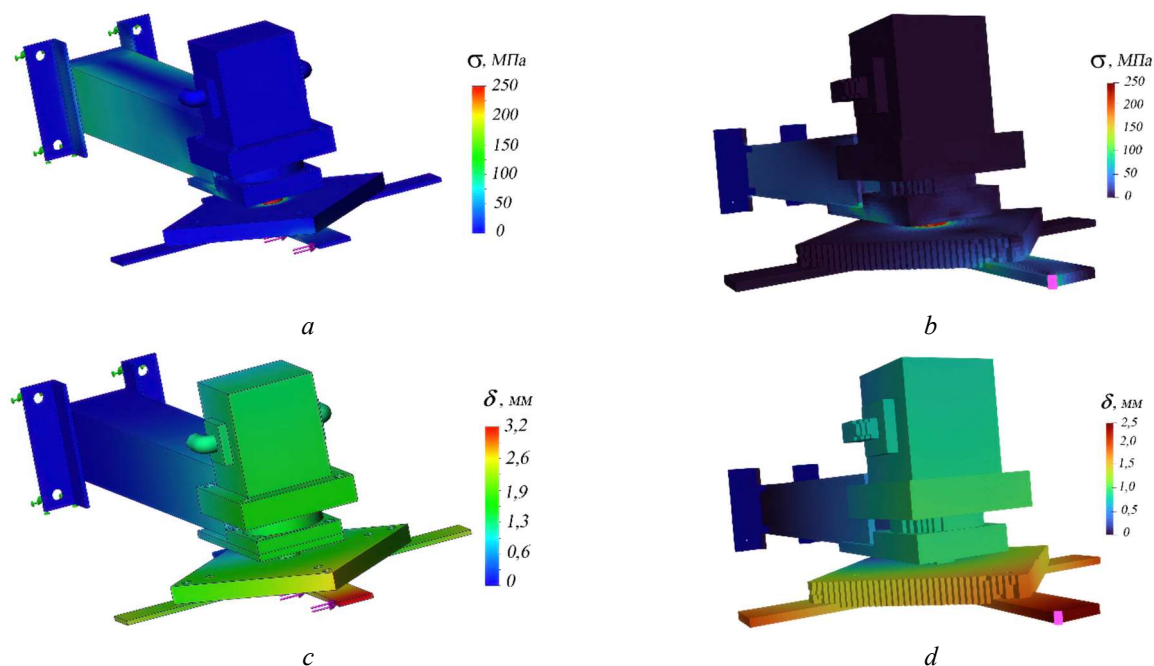


Рисунок 4. Результаты расчета напряжений и перемещений кустореза: *a* – напряжения по САПР, *b* – напряжения по методике, *c* – перемещения по САПР, *d* – перемещения по методике

Источник: собственный расчет авторов

Figure 4. Results of calculation of stresses and displacements of a brush cutter: *a* – stress according to CAD, *b* – stress according to the method, *c* – displacement according to CAD, *d* – displacement according to the method

Source: authors' own calculations

Таблица 2

Результаты расчета новой опорной балки кустореза и кромки ножа

Table 2

Calculation results for the new brush cutter support beam and blade edge

№ точки points	Координаты Coordinates			Напряжения Stresses		Δ σ, % Δ σ, %	Перемещения Displacements		Δ δ, % Δ δ, %
	X , мм X, mm	Y , мм Y, mm	Z , мм Z, mm	σ _{ко} м, МПа σ _{co} m, МПа	σ _м ет, МПа σ _m et, МПа		δ _{ком} , мм δ _{com} , mm	δ _м ет, мм δ _m et, mm	
Верхняя горизонтальная грань балки Upper horizontal edge of the beam									
1	205	126	50	18	13,4	34	0,001	0,0008	15
2	205	126	250	1	1,2	16	0,24	0,19	24
3	205	126	495	14	11,4	23	0,88	0,61	44
Боковая вертикальная грань балки Lateral vertical face of the beam									
4	16	86	50	82	58,3	40	0,011	0,008	39
5	165	86	250	64	44,2	44	0,28	0,19	43
6	165	86	495	8	11,8	48	0,95	0,64	47
Середина кромки ножа Center of the knife edge									
7	205	5	835	3	4,2	32	3,2	2,28	39

Источник: собственный расчет авторов

Source: authors' own calculations

Как следует из таблицы 2 разница между разработанной методикой и коммерческим САПР по напряжению находится в пределах 16...48 %, а по перемещениям в пределах 15...47 %. Полученные проценты также визуальны значительны, однако сами напряжения находятся в диапазоне 1...64 МПа что значительно ниже предела текучести 220 МПа, также снизились и перемещения с 5,9 и 8,3 мм до 3,2 и 2,28, то есть цель методики – быстрая отбраковка неудовлетворительных решений достигнута.

В результате расчета в обоих случаях наибольшее напряжение присутствует на валу. В модели вал жестко связан с пластиной подшипникового узла, однако в реальном прототипе сила будет передаваться на гидромотор и демпфироваться жидкостью, поэтому напряжения на валу будут меньше. В остальном палитра напряжений в обоих случаях не превышает предела текучести материала.

Проведенный анализ данных, представленных в таблицах 1 и 2, позволил установить, что максимальные напряжения в конструкции балки возникают в зоне её крепления к раме. Напряжения на верхней грани балки существенно ниже, чем на боковой, что обусловлено направлением приложения внешней нагрузки преимущественно к боковой поверхности.

В частности, для балки сечением 40×40 мм в точке №4 зафиксировано напряжение величиной 268 МПа, что превышает предел текучести стали (220 МПа). Данный вариант конструкции был признан неудовлетворительным, вследствие чего балка была заменена на новую, сечением 80×80 мм. В результате для точки №4 напряжение снизилось до 58,3 МПа, что значительно ниже предела текучести материала.

Замена балки также привела к снижению перемещений точек конструкции. Для балки 40×40 мм максимальное перемещение наблюдалось в точке №3 (8,3 мм), тогда как у кустореза с усиленной балкой — в точке ножа №7 (2,28 мм). Несмотря на увеличение плеча приложения нагрузки у кустореза, максимальные расчетные перемещения уменьшились более чем в 3,5 раза и соответствуют технологическим допускам, установленным для лесных орудий.

Таким образом, применение методики прочностного расчета продемонстрировало свою эффективность для обоснованного выбора конструктивных параметров лесных орудий.

Выводы

1. Реализован процесс расчёта НДС по линейно-упругой модели с заданием граничных условий на воксельной сетке который на выходе предоставляет файлы результатов (VTU/CSV), пригодных для визуализации и анализа.

2. Показано, что дискретизация STL-геометрии регулярными HEX8 элементами с интегрированием по $2 \times 2 \times 2$ точкам Гаусса обеспечивает устойчивую сходимость перемещений и напряжений для балочных консольных задач и узлов рамы при корректном наложении Дирихле/Неймана.

3. Методика позволяет выполнять первичный прочностной анализ, крупногабаритных механических узлов лесных машин и орудий, напрямую из САПР модели и тем самым ускорять цикл – эскиз – проверка – корректировка, без вовлечения специализированных коммерческих приложений, что особенно ценно для малых рабочих групп.

4. Установлено что при заданных нагрузках $F=3000$ Н максимальное напряжение у балки $L=500$, $40 \times 40 \times 3$ мм составило 268 МПа, что превышает предел текучести стали – 220 МПа. Методика позволила отбраковать эту балку и заменить на новую $L=500$, $80 \times 80 \times 3$ мм, получены напряжения 58,3 МПа. Таким образом неудовлетворительный вариант был исключен ещё до тяжёлых мультифизических расчётов.

Список литературы

1. Chen Q., Zhao Y., Wang D., Chen Z., Wang Q., Yuan X. Multi-Level Matching Optimization Design of Thin-Walled Beam Cross-Section for Tri-Axle Unmanned Forestry Vehicle Frame. *Forests*, 2025; 16(1): 69. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16010069>
2. Mergl V., Zeizinger L., Popela D., Kašpárek J. Strength analysis of different design solutions of boom extensions for attaching the harvester head to the excavator. *International Journal of Forest Engineering*, 2025; 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2025.2484948>
3. Muşa, E.C., Bitir I. Evaluating the Forest Road Systems Subjected to Different Loadings by Using the Finite Element Method. *Forests*, 2022; 13(11): 1872. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111872>
4. Mergl V., Kašpárek J. Verifying the Lifting and Slewing Dynamics of a Harvester Crane with Possible Leveling When Operating on Sloping Grounds. *Forests*, 2022; 13(2): 357. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020357>
5. Zhu B., Liu J., Yang C., Qu W., Ding P. Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 2023; 14(5): 1039. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051039>
6. Jia N., Guo L., Zhang Y., Liu J. Multi-Physical Field Coupling Simulation and Experimental Study on the Radiation Characteristics of Sawing Noise from Circular Saw Blades in Woodworking. *Forests*, 2025; 16(3): 442. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16030442>
7. Jia N., Guo L., Wang R., Liu, J. Design of Vibration and Noise Reduction for Ultra-Thin Cemented Carbide Circular Saw Blades in Woodworking Based on Multi-Objective Optimization. *Forests*, 2024; 15(9): 1554. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15091554>
8. Takeyama K., Yokochi H., Nishio S., Tsuchikawa S. Characteristics of resonance sound in a circular saw enclosure. *BioResources*, 2023; 18(4): 8473-8483. – DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.8473-8483>
9. Ding Y., Ma Y., Liu T., Zhang J., Yang C. Experimental Study on the Dynamic Stability of Circular Saw Blades during the Processing of Bamboo-Based Fiber Composite Panels. *Forests*, 2023; 14(9): 1855. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091855>
10. Ji B., Zhao Y., Chen J., Xu L., Zhou H., Zhou J. Vibration Control of Forestry Storage Ventilation Fans Through Structural Parameter Optimization Considering Substructure Uncertainty. *Forests*, 2025; 16(6): 1011. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16061011>
11. Liu Y., Ban Y., Zhang X., Zhao G., Wen J., Lin C. Tool-Branch Interaction Mechanism of Impact-Pruning Process Based on Finite Element Method. *Forests*, 2024; 15(11): 1902. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15111902>
12. Ban Y., Liu Y., Zhao X., Lin C., Wen J., Li W. Experimental Study on the Design and Cutting Mechanical Properties of Bionic Pruning Blades. *Forests*, 2024; 15(10): 1765. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15101765>
13. Krilek J., Tichý B., Kováč J., Melicherčík J., Kuvík, T. Design of a stationary disc chipper project for dendromass chipping with stress analysis FEM methods. *BioResources*, 2021; 16(4): 8205-8218. – DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.8205-8218>
14. Cao J., Fan B., Xiao S., Su X. Stability Analysis of Planetary Rotor with Variable Speed Self Rotation and Uniform Eccentric Revolution in the Rubber Tapping Machinery. *Forests*, 2024; 15(6): 1071. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061071>
15. Li X., Wang S., Guo Y., Zhang J., He L., Zhou J., Miao Y., Liu Z. Experiments and Simulation on the Effects of Arch Height Variation on the Vibrational Response of Paulownia Wood. *Forests*, 2025; 16(3): 545. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16030545>
16. Xuan Y., Xu L., Liu G., Zhou J. The Potential Influence of Tree Crown Structure on the Ginkgo Harvest. *Forests*, 2021; 12(3): 366. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030366>
17. Драпалюк М.В., Бухтояров Л.Д., Придворова А.В. Имитационная модель ротора кустореза с шестью лезвиями // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 3(43). – С. 121-129. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/10>

18. Драпалюк М.В., Бухтояров Л.Д., Прокудина А.В. Результаты исследований процесса резания ветвей ротором с шарнирно-сочлененными и жестко установленными лезвиями // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 80-88. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/7>

19. Драпалюк М.В., Бухтояров Л.Д., О.А. Куницкая и др. Изучение мощностных показателей и качества среза шарнирно-сочлененным и ножевым рабочими органами роторного кустореза // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 2(58). – С. 7-13. – DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-2-7-13>

20. Бухтояров Л.Д. Имитационное моделирование работы ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 38-49. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-38-49>

References

1. Chen Q., Zhao Y., Wang D., Chen Z., Wang Q., Yuan X. Multi-Level Matching Optimization Design of Thin-Walled Beam Cross-Section for Tri-Axle Unmanned Forestry Vehicle Frame. *Forests*, 2025; 16(1): 69. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16010069>

2. Mergl V., Zeizinger L., Popela D., Kašpárek J. Strength analysis of different design solutions of boom extensions for attaching the harvester head to the excavator. *International Journal of Forest Engineering*, 2025; 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2025.2484948>

3. Muşa, E.C., Bitir I. Evaluating the Forest Road Systems Subjected to Different Loadings by Using the Finite Element Method. *Forests*, 2022; 13(11): 1872. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111872>

4. Mergl V., Kašpárek J. Verifying the Lifting and Slewing Dynamics of a Harvester Crane with Possible Leveling When Operating on Sloping Grounds. *Forests*, 2022; 13(2): 357. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020357>

5. Zhu B., Liu J., Yang C., Qu W., Ding P. Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 2023; 14(5): 1039. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051039>

6. Jia N., Guo L., Zhang Y., Liu J. Multi-Physical Field Coupling Simulation and Experimental Study on the Radiation Characteristics of Sawing Noise from Circular Saw Blades in Woodworking. *Forests*, 2025; 16(3): 442. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16030442>

7. Jia N., Guo L., Wang R., Liu, J. Design of Vibration and Noise Reduction for Ultra-Thin Cemented Carbide Circular Saw Blades in Woodworking Based on Multi-Objective Optimization. *Forests*, 2024; 15(9): 1554. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15091554>

8. Takeyama K., Yokochi H., Nishio S., Tsuchikawa S. Characteristics of resonance sound in a circular saw enclosure. *BioResources*, 2023; 18(4): 8473-8483. – DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.8473-8483>

9. Ding Y., Ma Y., Liu T., Zhang J., Yang C. Experimental Study on the Dynamic Stability of Circular Saw Blades during the Processing of Bamboo-Based Fiber Composite Panels. *Forests*, 2023; 14(9): 1855. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14091855>

10. Ji B., Zhao Y., Chen J., Xu L., Zhou H., Zhou J. Vibration Control of Forestry Storage Ventilation Fans Through Structural Parameter Optimization Considering Substructure Uncertainty. *Forests*, 2025; 16(6): 1011. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16061011>

11. Liu Y., Ban Y., Zhang X., Zhao G., Wen J., Lin C. Tool-Branch Interaction Mechanism of Impact-Pruning Process Based on Finite Element Method. *Forests*, 2024; 15(11): 1902. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15111902>

12. Ban Y., Liu Y., Zhao X., Lin C., Wen J., Li W. Experimental Study on the Design and Cutting Mechanical Properties of Bionic Pruning Blades. *Forests*, 2024; 15(10): 1765. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15101765>

13. Krilek J., Tichý B., Kováč J., Melicherčík J., Kuvík, T. Design of a stationary disc chipper project for dendromass chipping with stress analysis FEM methods. *BioResources*, 2021; 16(4): 8205-8218. – DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.8205-8218>

14. Cao J., Fan B., Xiao S., Su X. Stability Analysis of Planetary Rotor with Variable Speed Self Rotation and Uniform Eccentric Revolution in the Rubber Tapping Machinery. *Forests*, 2024; 15(6): 1071. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061071>

15. Li X., Wang S., Guo Y., Zhang J., He L., Zhou J., Miao Y., Liu Z. Experiments and Simulation on the Effects of Arch Height Variation on the Vibrational Response of Paulownia Wood. *Forests*, 2025; 16(3): 545. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16030545>
16. Xuan Y., Xu L., Liu G., Zhou J. The Potential Influence of Tree Crown Structure on the Ginkgo Harvest. *Forests*, 2021; 12(3): 366. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030366>
17. Drapalyuk M.V., Bukhtoyarov L.D., Pridvorova A.V. *Imitatsionnaya model rotora kustoreza s shestyuu lezviyami* [Simulation model of a brush cutter rotor with six blades]. *Lesotekhnicheskii zhurnal / Forestry Engineering journal*, 2021; Vol. 11, 3 (43): 121–129. – DOI: <https://doi.org/34220/issn.2222-7962/2021.3/10>
18. Drapalyuk M.V., Bukhtoyarov L.D., Prokudina A.V. *Rezultaty issledovaniy protsessa rezaniya vetvey rotorom s sharnirno-sochlenennymi i zhesko ustanovlennymi lezviyami* [Results of research into the process of cutting branches by a rotor with articulated and rigidly mounted blades]. *Lesotekhnicheskii zhurnal / Forestry Engineering journal*, 2022; Vol. 12, 2(46): 80–88. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/7>
19. Drapalyuk M.V., Bukhtoyarov L.D., Kunitskaya O.A. *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. – DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-2-7-13>
20. Bukhtoyarov L.D. *Imitatsionnoe modelirovanie raboty rotora kustoreza s sharnirno ustanovlennymi lezviyami* [Simulation modeling of the operation of a brush cutter rotor with hinged blades]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2025; 29(1): 38–49. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-1-38-49>

Сведения об авторах

✉ Бухтояров Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, 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: vglt-a-mlx@yandex.ru.

Гнусов Максим Александрович – доктор технических наук, зав. кафедрой Безопасности жизнедеятельности и правовых отношений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: mgnusov@ya.ru.

Лысыч Михаил Николаевич – кандидат технических наук, директор Инжинирингового центра, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Information about the authors

✉ Leonid D. Bukhtoyarov – candidate of technical sciences, chief researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglt-a-mlx@yandex.ru.

Maksim A. Gnusov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Life Safety and Legal Relations, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: mgnusov@ya.ru.

Mikhail N. Lysych - candidate of technical sciences, director of the Engineering Center, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Моделирование влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в дорожной одежде лесотранспортной системы

Артём В. Степанов✉, stepanov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>

Василий К. Катаров, vkatarov@petrsu.ru <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>

Владимир С. Сюнёв, siounev@petrsu.ru <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Геннадий Н. Колесников, kgn@petrsu.ru <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

Авторы представляют модель и методику ее применения в прикладном анализе трещинообразования дорожных одежд при вертикальной нагрузке с учетом зависимости от коэффициента Пуассона, влияние которого в известной литературе исследовано недостаточно. Новизна и практическое значение модели и методики заключается в возможности ее использовании для анализа влияния коэффициента Пуассона на относительную глубину трещин в конструкциях дорожных одежд. Результаты расчетов, полученные с использованием данного подхода, позволяют проводить сравнительную оценку влияния стабилизирующих добавок к грунтовым смесям на их трещиностойкость в дорожной конструкции. Кроме того, в данной работе рассматривается механизм локализованного разрушения дорожной одежды и образования выбоин с учетом влияния коэффициента Пуассона. В одном из примеров модель показывает, что если для песчано-гравийной смеси, например, среднее значение коэффициента Пуассона равно 0,25, и все значения коэффициента (с учетом случайных отклонений) попадают в доверительный интервал $[0,15...0,35]$ с надежностью 95%, то при фиксированном сжимающем напряжении 1 МПа прогнозируемая относительная глубина трещины находится в интервале $[0,20...0,43]$. Кроме того, методика позволяет определить диапазон прогнозируемых нагрузок при фиксированной глубине трещин. Процедура проверки результатов моделирования включает испытания на одноосное сжатие стандартных образцов из распространенных дорожно-строительных материалов и обработку экспериментальных данных по разработанной методике. Анализ полученных результатов с практической точки зрения указывает на потенциальную технико-экономическую эффективность разработки.

Ключевые слова: прочность грунтов, вариабельность свойств, дорожное полотно, трещинообразование, коэффициент Пуассона, локальное повреждение

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: Моделирование влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в дорожной одежде лесотранспортной системы / А. В. Степанов, В. К. Катаров, В. С. Сюнёв, Г. Н. Колесников // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 217–227. – Библиогр.: с. 224–226 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/14>

Поступила 25.04.2025 Пересмотрена 26.05.2025 Принята 15.09.2025 Опубликована онлайн 25.09.2025

Modeling the influence of Poisson's ratio on crack formation in the road surface of the forest transport system

Artyom V. Stepanov✉, stepanov@petrsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>

Vasiliy K. Katarov, vkatarov@petrsu.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>

Vladimir S. Syuneyev, siounev@petrsu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Gennady N. Kolesnikov, kgn@petrsu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

Petrozavodsk State University, Lenin Street, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

Abstract

The authors present a model and develop a methodology for its application in the applied analysis of crack formation in pavement structures under vertical loading, accounting for Poisson's ratio dependence. The proposed methodology serves as a research tool for analyzing the influence of Poisson's ratio on relative crack depth in pavement constructions. Computational results obtained through this approach enable comparative evaluation of how soil mixture stabilizers affect crack resistance in road structures. Furthermore, this study examines the mechanism of localized pavement failure and pothole formation, considering Poisson's ratio effects. In one example, the model demonstrates that for sand and gravel mixtures with an average Poisson's ratio of 0.25, where all values (taking into account random variations) fall within the confidence interval of [0.15-0.35] at 95% reliability, the predicted relative crack depth ranges from [0.20-0.43] at a fixed compressive stress of 1 MPa. In addition, the methodology defines a range of predicted loads for the specified crack depths. Verification procedures include uniaxial compression testing of standard specimens made from conventional road construction materials, with experimental data processed according to the developed methodology. Practical analysis of the results suggests potential techno-economic benefits of this development.

Keywords: *soil strength, variability of properties, road surface, crack formation, Poisson's ratio, local damage*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Stepanov A. V., Katarov V. K., Syuneyev V. S., Kolesnikov G. N. (2025). Modeling the influence of Poisson's ratio on crack formation in the road surface of the forest transport system. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 217-227 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/14>

Received 25.04.2025. Revised 26.05.2025. Accepted 15.09.2025. Published online 25.09.2025

Введение

Автомобильные дороги являются важнейшим элементом инфраструктуры, необходимым для социально-экономического развитию регионов. Устойчивое функционирование автомобильных дорог зависит от множества факторов, среди которых ключевую роль играют механические свойства грунтов как основного строительного материала автомобильных дорог. К важнейшим из механических свойств относятся прочность при сжатии, модуль

упругости и модуль деформации грунтов. Эти свойства грунтов как опорных поверхностей движения лесных машин исследовали многие авторы, среди которых А. А. Krivosheev и др. (2025) [1], А. В. Степанов и др. (2024) [2]. Работа V. Shekov и G. Kolesnikov (2024) [3] показала, что к числу важнейших характеристик можно отнести также коэффициент Пуассона, влияние которого в объектах дорожного строительства исследовано в меньшей степени, поэтому внимание в данной статье фокусируется на

этом коэффициенте. Для обычно используемых в дорожном строительстве материалов коэффициент Пуассона изменяется в пределах от нуля до 0,5. Например, типичны следующие значения коэффициента Пуассона для гранулированных: сыпучий песок (0,20–0,40), песок средней плотности (0,25–0,40), плотный песок (0,30–0,45), песчано-гравийная смесь (0,15–0,35), связные грунты ($\sim 0,50$), лед при температуре минус 16°C (0,32).

Коэффициент Пуассона определяет не только соотношение продольных (вертикальных) и поперечных (горизонтальных) относительных деформаций, но и распределение напряжений по тем же направлениям. В зависимости от свойств материала дорожного полотна, таких, как минеральный и гранулометрический состав, влажность и температура, горизонтальные напряжения могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Если сопротивление грунта растяжению низкое, то появляются трещины.

Материалы с низким коэффициентом Пуассона (близким к нулю) имеют меньшую склонность к поперечным (по отношению к линии действия вертикальной нагрузки от собственного веса и давления колес автомобиля) деформациям, что может способствовать снижению риска образования трещин. Однако материалы с низким коэффициентом Пуассона могут быть более хрупкими. Напротив, материалы с высоким коэффициентом Пуассона (близким к 0,5) обладают большей пластичностью, что улучшает их трещиностойкость, но может приводить к избыточным деформациям под нагрузкой и появлению колеи. Такими образом, оптимальное значение коэффициента Пуассона должно соответствовать таким требованиям, как прочность дорожного полотна и его устойчивость к трещинообразованию. Найти оптимальное или компромиссное решение позволяет применение стабилизирующих добавок к грунтам в дорожном строительстве, что рассмотрели в упомянутой выше А. В. Степанов и др. (2024) [2].

Т. к. влияние коэффициента Пуассона на трещинообразование дорожного покрытия исследовано недостаточно детально, то определенный научный интерес представляют результаты, полученных в смежных областях прикладных исследований. В

этой связи заметим, что стабилизированную добавками грунтовую смесь, особенно после промерзания, можно рассматривать как аналог бетона. Влияние комплексных добавок на плотность, прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона исследовали Л. Я. Крамар и др. (2022) [4]. Результаты этого исследования подтверждают отмеченную выше закономерность повышения хрупкости бетона с уменьшением коэффициента Пуассона от 0,24 до 0,18. Следует, однако, учитывать отличительные особенности условий работы дорожной конструкции в регионах с холодным климатом, материал которой в межсезонные периоды при оттаивании более пластичен, но при промерзании тот же материал трансформируется в хрупкий материал. Соответственно, значения коэффициента Пуассона циклически изменяются в течение года под воздействием температуры и влажности. Кроме того, тип грунта может существенно влиять на эффект стабилизации, что следует из работ Wang S. и др. (2022) [5], О. Н. Бурмистровой и др. (2021) [6].

С учетом перечисленных выше условий правомерно предположить, что коэффициент Пуассона для материала дорожной конструкции в каждый момент времени может быть охарактеризован некоторым средним значением и случайным отклонением от среднего значения. Поэтому с физической точки зрения адекватным является использование нормально распределенной величины коэффициента Пуассона при анализе его влияния на трещинообразование дорожного полотна при вертикальной нагрузке. В этом случае характеристики трещин будут также случайными.

Соответственно, целью данной работы является разработка методики для прикладного анализа трещинообразования в дорожном полотне в зависимости от значений коэффициента Пуассона и нагрузки. Разработка такой методики существенно упрощается благодаря относительно небольшому диапазону значений коэффициента Пуассона и наличию хорошо известных подходов к учету влияния случайных факторов в прикладных задачах, что отмечают А. Senova и др. (2023) [7].

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Данная работа является эмпирическим исследованием. Объектом исследования является материал дорожной конструкции, в которой при вертикальной нагрузке от автотранспорта могут появляться трещины.

Предметом исследования являются условия появления трещин и их характеристики в зависимости от значений коэффициента Пуассона и вертикальной нагрузки.

Инструментом исследования является предлагаемая методика моделирования поведения образцов грунта при осевом сжатии. Для проверки точности результатов моделирования использованы известные по литературе данные. Температурные трещины в данной работе не рассматриваются.

Сбор данных

В качестве экспериментальных данных использованы известные по литературе результаты испытаний цилиндрических образцов мерзлого грунта двух типов на одноосное сжатие, диаметр и высота которых равны, соответственно, 61.8 мм × 125 мм и 61.8 мм × 50 мм, согласно Ну F. и др. (2021) [8]. Данные о трещинообразовании в указанных образцах получены нами с использованием модели V. Shekov и G. Kolesnikov (2024) [3], которая первоначально предназначалась для анализа поведения хрупких горных пород при одноосном сжатии без учета влияния естественной изменчивости коэффициента Пуассона, предела прочности, модуля упругости и других физико-механических свойств. Анализ результатов применения этой модели при обработке экспериментальных данных показал, что целесообразно дополнить данную модель блоком для учета вероятностных характеристик коэффициента Пуассона перечисленных выше материалов, обычно используемых в дорожном строительстве. В итоге, в рамках данного исследования получена новая модификация модели, отличающаяся дополнительным блоком для анализа влияния вариаций коэффициента Пуассона на трещинообразование грунтов, используемых в дорожном строительстве. Относительно ограничений на область применения этой модификации отметим, что она предназначена для ана-

лиза хрупких или почти хрупких материалов, и неприменима к глинистым грунтам после их оттаивания. В итоге получен инструмент для анализа экспериментальных данных и исследования закономерностей влияния коэффициента Пуассона на трещинообразование в материале для дорожного строительства, что, с практической точки зрения, необходимо для обоснования рекомендаций по улучшению качества и повышению долговечности лесовозных дорог.

Воспроизводимость

Чтобы обеспечить воспроизводимость всех стадий выполненного исследования, мы использовали результаты испытаний, опубликованные другими авторами в открытом доступе в Интернет. Соответствующие ссылки приведены в списке литературы к данной статье.

Новые данные, которые получены по предлагаемой методике в соответствии с целью работы, могут быть воспроизведены после несложных инженерных вычислений по формулам, представленным в данной статье.

Анализ данных

Интерес представляет прогнозирование глубины трещины на дневной поверхности дорожного полотна в зависимости от вертикальной нагрузки. Подобно тому, как о прочности материала судят по результатам испытаний образцов, мы используем образцы стандартной формы для анализа трещинообразования в перечисленных выше материалах для дорожного строительства. Экспериментальные данные для такого анализа можно найти в цитированной выше литературе, однако остаются недостаточно изученными вопросы прогнозирования трещинообразования в зависимости от вертикальной нагрузки.

Относительная глубина трещины на поверхности образца цилиндрической формы при осевом сжатии определяется уравнением из работы V. Shekov и G. Kolesnikov (2024) [3]:

$$\frac{t}{R} = \frac{n\sigma_z}{n\sigma_z + \sigma_t^{(peak)}}. \quad (1)$$

В уравнении (1) обозначено: t – глубина трещины; R – радиус образца; σ_z – вертикальное напряжение; $\sigma_t^{(peak)}$ – прочность грунта при растяжении; коэффициент n от коэффициента Пуассона ν :

$$n = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2)$$

Например, согласно Ну Ф. и др. (2021) [8], прочность одной из разновидностей мерзлого грунта при температуре минус 10°C $\sigma_t^{(peak)} = 3,398$ МПа; $\sigma_t^{(peak)} = 0,725$ МПа. σ_z и ν – независимые переменные, которые могут принимать значения из интервалов $\sigma_z = [0, 3,398]$, $\nu = [0, 0,5]$. Для указанной выше песчано-гравийной смеси величина ν предполагается нормально распределенной, с математическим ожиданием, равным 0,25 и среднеквадратическим отклонением, равным 0,05. Таким образом, значения коэффициента Пуассона находятся в доверительном интервале $[0,15, 0,35]$ с достоверностью 95%. Границы этого интервала совпадают с приведенными выше для песчано-гравийной смеси. Результатом моделирования по рассмотренной методике является доверительный интервал для относительной глубины поверхностной трещины при осевом сжатии цилиндрического образца. Вычисления по формулам (1) и (2) и обработка полученных данных могут быть выполнены с использованием модуля “Анализ данных” в MS Excel, включающий стандартный генератор случайных чисел.

Результаты

Результаты вычислений по рассмотренной выше методике с использованием исходных данных, указанных в комментариях к формулам (1) и (2) представлены на Рисунке 1. Точки 4, 5 и 6 соответствуют полному разрушению образца.

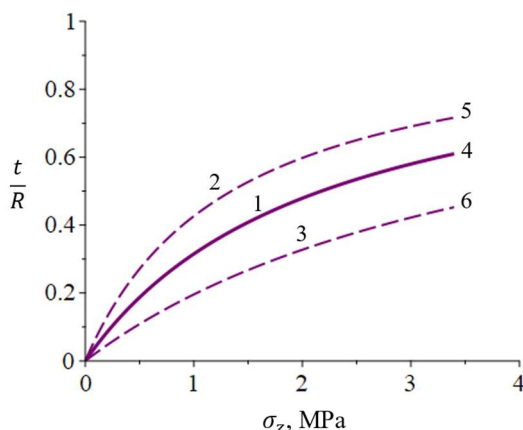


Рисунок 1. Кривые 1, 2 и 3, соответственно, математическое ожидание, верхняя и нижняя границы

доверительного интервала для относительной глубины трещины в зависимости от напряжения σ_z .

Figure 1. Curves 1, 2 and 3 are, respectively, the mathematical expectation, the upper and lower boundaries of the confidence interval for the relative crack depth depending on the stress σ_z .

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Кривые 1, 2 и 3 на Рисунке 1 получены при увязанных выше значениях коэффициента Пуассона, соответственно, 0,25, 0,15 и 0,35. Полному разрушению образца предшествует развитие системы трещин. Анализ данных (Рисунок 1) позволяет получить определенную информацию, о механизме разрушения, важную с точки зрения практики дорожного строительства. Детализируя анализ, рассмотрим Рисунок 2.

Точки 2 и 3 на Рисунке 2 определяют доверительный интервал значений вертикального напряжения $[0,51, 1,75]$ МПа, если относительная глубина трещины равна 0,3. Принимая во внимание естественную неоднородность реальных материалов для дорожного строительства, правомерно предположить, что в наиболее слабом звене трещины могут появиться при относительно небольшой нагрузке (точка 2 на Рисунке 2).

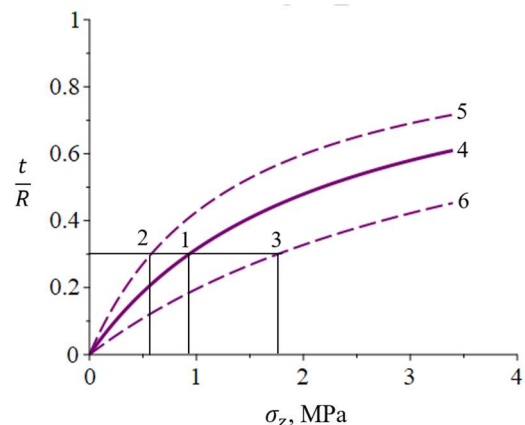


Рисунок 2. К анализу причин возникновения локальных повреждений дорожного покрытия (выбоин)
Figure 2. Towards analysis of the causes of local damage to the road surface (potholes)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition.

Трещины являются концентраторами напряжений, поэтому повторяющаяся нагрузка приведет к

прогрессирующему разрушению, затем к появлению выбоин и необходимости ямочного ремонта. Наблюдения за состоянием автомобильных дорог показывают, что отмеченные причины появления выбоин характерны для всех дорог, построенных из обычно используемых материалов, включая асфальтобетон и модифицированные добавками грунты.

Анализ данных

Используя полученные результаты (Рисунок 1) продолжим анализ причин локального разрушения дорожного полотна. Рассмотрим Рисунок 3. Точки 2 и 3 на Рисунке 3 определяют доверительный интервал значений относительно глубины трещины $[0,20, 0,43]$, если вертикальное напряжение равно 1 МПа. Точки 4, 5 и 6 на Рисунках 2 и 3 соответствуют полному разрушению образца.

Вновь принимая во внимание естественную неоднородность реальных материалов, находим, что при одном и том же относительно небольшом напряжении (1 МПа) могут появиться трещины, глубина которых отличается примерно в два раза (точки 2 и 3 на Рисунке 3).

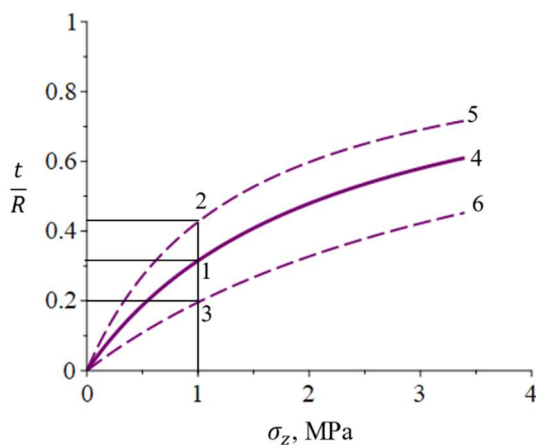


Рисунок 3. К анализу причин возникновения локальных повреждений дорожного покрытия (выбоин)

Figure 3. Towards analysis of the causes of local damage to the road surface (potholes)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition.

Глубина трещины положительно коррелирует с коэффициентом Пуассона при прочих равных условиях. Продолжая анализ причин локальных раз-

рушений дорожного полотна правомерно предположить, что эти разрушения (выбоины) будут появляться и иметь различную глубину при одной и той же нагрузке на дорожное полотно. Уменьшить отрицательные последствия рассмотренных эффектов, вызванных влиянием вариаций коэффициента Пуассона позволяют временные ограничения воздействий на дорожное полотно в межсезонный период, прежде всего в северных регионах.

Целесообразна также разработка и применение модификаторов и добавок для повышения прочности грунтов на растяжение и корректировки (по возможности) коэффициента Пуассона с целью повышения качества дорожных покрытий.

Обсуждение

Представленный выше анализ закономерностей изменения относительной глубины трещины в зависимости от коэффициента Пуассона и нагрузки позволил получить количественные оценки, характеризующие механизм появления трещин в дорожном полотне. Полученные данные не противоречат экспериментальному исследованию образцов грунтов F. Ну и др. (2021) [8], которые отмечают, что на стадии после пика напряжения наблюдались явные почти вертикальные трещины растяжения и наклонные трещины сдвига, что типично для хрупких материалов. Это наблюдение согласуется с результатами расчетов по представленной методике, в которой растягивающие напряжения пропорциональны радиусу образца:

$$\sigma_t = n\sigma_z \left(\frac{R}{t} - 1 \right). \quad (3)$$

Уравнение (3) получено из (1) после замены $\sigma_t^{(peak)}$ на σ_t . Под действием возрастающей нагрузки (σ_z) фрагменты образца откалываются от его основной части и условный радиус поперечного сечения уменьшается, что вызывает уменьшение σ_t до предела, при котором рост трещин растяжения прекращается. Однако напряжения сдвига продолжают расти, достигают предела прочности материала при сдвиге (который выше, чем при растяжении) и образец разрушается полностью, что показали упомянутые выше эксперименты F. Ну и др. (2021) [8]. Зависимость сжимающего напряжения от деформации для рассмотренного примера приведена на Рисунке 4.

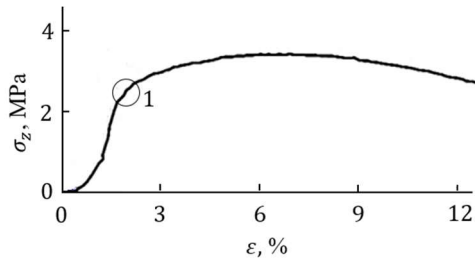


Рисунок 4. Зависимость напряжений от деформаций

Figure 4. Dependence of stresses on deformations

Источник: композиция авторов на основе статьи F. Hu и др. (2021) [8]

Source: author's composition based on article F. Hu и др. (2021) [8]

Маркер 1 на Рисунке 4 обозначает область, в которой напряжение сдвига достигает пороговых значений и появляются трещины сдвига. Таким образом, результаты моделирования в целом согласуются с экспериментами. Однако следует учитывать, что аналогично пороговому значению для напряжений сдвига, существует порог растягивающих напряжений, превышение которого ведет к появлению отмеченных выше трещин растяжения. Это означает, что новые трещины не появляются при любой сколь угодно малой нагрузке, и напряжение σ_z на Рисунках 1-3 соответствует нагрузке, превышающей обозначенный выше предел прочности при растяжении $\sigma_t^{(peak)} = 0,725$ МПа. Детализация этого вопроса может составить предмет дальнейших исследований.

Кроме того, к вопросам для дальнейших исследований могут быть отнесены, такие, как влияние прочности местных грунтов в зависимости от их свойств и влияние технологии дорожного строительства. Другие характеристики грунтов, указанные в ОДМ 218.3.076-2016, как отметили А.А. Лыткин и др. (2024) [9], В. Yang и др. (2022) [10], П. А. Сокол (2023) [11] и др. также требуют продолжения экспериментальных исследований с учетом экологических требований и региональных особенностей, вклад в изучение которых внесли В. К. Катаров и др.

(2021) [12], Ze A. Ngo'o и др. (2022) [13], Р. А. Бехтерев и др. (2022) [14], Е. О. Графова и др. (2023) [15, 16], Р. В. Ryabukhin и др. (2022) [17]. Рассмотренная выше модель и методика анализа локальных разрушений в виде выбоин дополняет набор инструментов для прогнозирования состояния дорожного покрытия в целях повышения качества автомобильных дорог S. Tampekis (2024) [18], K. Piechowiec (2024) [19], J. Xing (2024) [20], L. V. Van. (21) [2024],

Результаты данной работы указывают на потенциальный технико-экономический эффект и целесообразность продолжения исследований материалов и технологий дорожного строительства для повышения их качества с учетом рассмотренного выше влияния коэффициента Пуассона.

Заключение

Предложена модель и разработана методика ее применения для прикладного анализа трещинообразования в дорожном полотне при вертикальной нагрузке в зависимости от коэффициента Пуассона.

С использованием разработанной методики выполнен анализ закономерностей влияния коэффициента Пуассона на относительную глубину трещин в покрытии автомобильной дороги. Результаты вычислений по разработанной методике предназначены для сравнительной оценки сопротивления трещинообразованию материалов, обычно используемых в дорожном строительстве.

С учетом влияния коэффициента Пуассона выполнен анализ механизма локального разрушения дорожного полотна и появления выбоин.

Результаты анализа указывают на возможность получения технико-экономического эффекта за счет уменьшения трещинообразования после дополнительных исследований свойств местных грунтов.

Список литературы

1. Кривошеев, А. А., Швецов, А. С., Бурмистрова, О. Н., Григорьев, И. В., Ревяко, С. И., Охлопкова, М. К. Обоснование необходимости исследования воздействия валочно-трелёвочно-процессорных машин на почвогрунты лесосек на склонах // *Resources and Technology*. – 2024. – Т. 21. – №4, – С. 66–120. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=77199521>
2. Степанов А.В., Катаров В.К., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Колесников Г.Н. Влияние стабилизирующих добавок на модули упругости и деформации грунтовой смеси основания дорожной одежды при транспортном освоении лесосырьевой базы юга Республики Карелия. 2024. Т. 14. № 3 (55). С. 222-237. // *Лесотехнический журнал*. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 222–237. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74523776>
3. Shekov V., Kolesnikov G. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure. *Applied Sciences*. 2024; 14(24), 11552. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app142411552>
4. Крамар Л.Я., Мордовцева М.В., Погорелов С.Н., Иванов И.М. (2022). Структура цементного камня с комплексными добавками и ее влияние на деформационные свойства бетонов. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 35–45. DOI: 10.14529/build220304. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49371654>
5. Wang S., Guo S., Gao X., Zhang P., Li G. Effects of cement content and soil texture on strength, hydraulic, and microstructural characteristics of cement-stabilized composite soils. *Bull Eng Geol Environ*. 2022; 81, 264. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02734-8>
6. Бурмистрова О.Н., Просужих, А.А., Рудов, С.Е., Куницкая, О.А., Григорьев, И.В. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки, и физико-механических свойств почвогрунта. // *Resources and Technology*. – 2021. – Т. 18. – №. 1. – С. 94-124. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45075548>
7. Senova A., Tobisova A., Rozenberg, R. New Approaches to Project Risk Assessment Utilizing the Monte Carlo Method. *Sustainability*. 2023, 15, 1006. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021006>
8. Hu F., Li Z., Tian Y., Hu R. Failure Patterns and Morphological Soil–Rock Interface Characteristics of Frozen Soil–Rock Mixtures under Compression and Tension. *Applied Sciences*. 2021; 11, 461. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010461>
9. Лыткин А.А., Долгих Г.В., Пролыгин А.С. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог. *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2024; 2 (96): 290-313. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. -URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65735918>
10. Yang B., Li H., Li H., Ge N., Ma G., Zhang H., Zhang X., Zhuang L. Experimental investigation on the mechanical and hydraulic properties of urease stabilized fine sand for fully permeable pavement. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2022; 11 (1): 60–71. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.12.002>.
11. Сокол П.А., Божко А.В., Новикова Т.П., Ребко С.В. Гидромеханические трансмиссии лесотранспортных машин: технологическая связь с воздействием на почвенно-растительную среду. *Лесотехнический журнал*. 2023; 2 (50): 179-197. - DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525091>.
12. Катаров В.К., Алешина Н.В., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Марков В.И. Оценка уплотненного состояния почвогрунтов при строительстве лесной дороги. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2021; 6: С. 106-117. - DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-106-117>. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47326208>.
13. Ngo'o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Lobe Bille J. F., Mvindi Mvindi W. P., Mebouinz D. L., Onana V. L. Exsitu and In-situ Manufacturing Procedures for Optimizing the Characteristics of a Soil Concrete Based on Lateritic Gravels and Granitic Aggregates: Application in Road Construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2022; 17 (2): 1-14. - DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00231-5>.
14. Бехтерев Р.А., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Басалаев А.А. Обзор методов стабилизации пучинистых грунтов Кировской области. *Инженерный вестник Дона*. 2022; 6 (90): 356-374. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49066629>.
15. Графова Е.О., Степанов А.В., Сюнёв В.С., Катаров В.К. Повышение экологической безопасности трассы Р-21 "КОЛИА" как центрального элемента лесной инфраструктуры Карелии. *Resources and Technology*. 2023; 1: 112-128. - DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.6823>. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50510688>
16. Графова Е.О., Сюнёв В.С., Горбач В.В. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-Западного региона РФ. *Лесотехнический журнал*. 2023; 2 (50): 5-24. - DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>
17. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest

management: a case study of the Far East. Forest Science and Technology. 2022; 18 (4): 190-200. – DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

18. Tampekis S., Kantartzis A., Arabatzis G., Sakellariou S., Kolkos G., Malesios C. Conceptualizing Forest Operations Planning and Management Using Principles of Functional Complex Systems Science to Increase the Forest's Ability to Withstand Climate Change. Land. 2024, 13(2), 217. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land13020217>

19. Piechowiec K., Szymanek S., Kowalski J., Lendo-Siwicka M. Stabilization of Loose Soils as Part of Sustainable Development of Road Infrastructure. Sustainability. 2024; 16(9):3592. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su16093592>

20. Xing J., Sun S., Huang Q., Chen Z., Zhou Z. Application of Geoinformatics in Forest Planning and Management. Forests. 2024; 15(3):439. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15030439>

21. Van L.V., Tung N.T. Dynamic Load Determination of a Multi-purpose Forest Fire Fighting Vehicle When Operating on Forestry Road. J. Vib. Eng. Technol. 12, 3507–3517 (2024). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01061-w>

22. Боргонутдинов, А. М., Рудов, С. Е., Григорьев, И. В., Ефимов, Д. С., Швецова, В. В. (2022). Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, (2), 146-158. - DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48211757>

References

1. Krivosheev A. A., Shvetsov A. S., Burmistrova O. N., Grigoriev I. V., Revyako S. I., Okhlopko M. K.. *Obosnovanie neobходимosti issledovaniya vozdeystviya valочно-trelyovочно-processornykh mashin na pochvogrunt lesosk na sklonah* [Justification of the need to study the impact of felling-skidding-processing machines on the soil of logging sites on slopes]. Resources and Technology. 2024; Vol. 21, No. 42024. №4, pp. 66–120 (in Russ.). - DOI: 10.15393/j2.art.2024.8083

2. Stepanov A. V., Katarov V. K., Syuney V. S., Ratkova E. I., Kolesnikov G. N. (2024). *Vliyanie stabiliziruyushchih dobavok na moduli uprugosti i deformatsii gruntovoy smesi osnovaniya dorozhnoy odezhdyy pri transportnom osvoenii lesosyr'evoy bazy yuga Respubliki Kareliya*. [The influence of stabilizing additives on the modulus of elasticity and deformation of the soil mixture of the pavement base during the transport development of the forest resource base in the south of the Republic of Karelia]. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 222-237 (in Russ.). - DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/13>.

3. Shekov V., Kolesnikov G. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure. Applied Sciences. 2024; 14(24): 11552. - DOI: <https://doi.org/10.3390/app142411552>

4. Kramar L.Ya., Mordovtseva M.V., Pogorelov S.N., Ivanov I.M. *Struktura cementnogo kamnya s kompleksnymi dobavkami i ee vliyanie na deformatsionnye svoystva betonov* [The Structure of Cement Stone with Complex Additives and its Effect on the Deformation Properties of Frame Concrete]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture. 2022, vol. 22, no. 3, pp. 35–45. (in Russ.). - DOI: 10.14529/build220304

5. Wang S., Guo S., Gao X., Zhang P., Li G. Effects of cement content and soil texture on strength, hydraulic, and microstructural characteristics of cement-stabilized composite soils. Bull Eng Geol Environ. 2022; 81, 264. - DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02734-8>

6. Burmistrova O.N., Prosuzhikh, A.A., Rudov, S.E., Kunickaya, O.A., Grigor'ev, I.V. *Eksperimental'nye issledovaniya proizvoditel'nosti forvardera s uchetom ego ekspluatatsionnykh harakteristik, parametrov lesoski, i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvogruntov*. [Experimental studies of forwarder performance taking into account its operational characteristics, cutting area parameters, and physical and mechanical properties of soil] // Resources and Technology. 2021, 18, no 1, pp. 94-124. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45075548>

7. Senova A., Tobisova A., Rozenberg, R. New Approaches to Project Risk Assessment Utilizing the Monte Carlo Method. Sustainability. 2023, 15, 1006. - DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021006>.

8. Hu F., Li Z., Tian Y., Hu R. Failure Patterns and Morphological Soil–Rock Interface Characteristics of Frozen Soil–Rock Mixtures under Compression and Tension. Applied Sciences. 2021; 11, 461. - DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010461>

9. Lytkin A.A., Dolgih G.V., Prolygin A.S. *Puti uvelicheniya mezhremontnykh srokov sluzhby avtomobil'nykh dorog*. [Ways to increase the inter-maintenance period of roads]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'nodorozhnogo universiteta = The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 2 (96): 290-313.- DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. (In Russ.). - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65735918>.

10. Yang B., Li H., Li H., Ge N., Ma G., Zhang H., Zhang X., Zhuang L. Experimental investigation on the mechanical and hydraulic properties of urease stabilized fine sand for fully permeable pavement. International Journal of Transportation Science and Technology. 2022; 11 (1): 60–71. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.12.002>

11. Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rebko S.V. *Gidromekhanicheskie transmissii lesotransportnykh mashin: tekhnologicheskaya svyaz' s vozdeystviem na pochvenno-rastitel'nyuyu sredu*. [Hydro-mechanical powertrain for

timber transport vehicles: technological relationship with the impact on the soil and plant environment]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2023; 2 (50): 179-197. - DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>. (In Russ.). - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525091>

12.Katarov V.K., Aleshina N.V., Syunyov V.S., Rat'kova E.I., Markov V.I. *Ocenka uplotnennogo sostoyaniya pochvogruntov pri stroitel'stve lesnoj dorogi*. [Assessment of soil compacted state in forest road construction]. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*. 2021; 6: S. 106-117. - DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-106-117>. (In Russ.). - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47326208>.

13.Ngo'o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Lobe Bille J. F., Mvindi Mvindi W. P., Mebouinz D. L., Onana V. L. Exsitu and In-situ Manufacturing Procedures for Optimizing the Characteristics of a Soil Concrete Based on Lateritic Gravels and Granitic Aggregates: Application in Road Construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2022; 17 (2): 1-14.- DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00231-5>

14.Bekhterev R.A., YUrkin YU.V., Avdonin V.V., Basalaev A.A. *Obzor metodov stabilizacii puchinistyh gruntov Kirovskoj oblasti*. [Overview of methods for stabilizing heaving soils in the Kirov region]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022; 6 (90): 356-374. (In Russ.). - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49066629>.

15.Grafova E.O., Stepanov A.V., Syunyov V.S., Katarov V.K. *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti trassy R-21 "KOLA" kak central'nogo elementa lesnoj infrastruktury Karelii*. [Increasing the environmental safety of the R-21 "KOLA" road as a central element of the Karelian forest infrastructure]. *Resources and Technology*. 2023; 1: 112-128. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.6823>. (In Russ.). - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50510688>.

16.Grafova E.O., Syunyov V.S., Gorbach V.V. *Analiz faktorov negativnogo vozdejstviya lesozagotovi-tel'nogo proizvodstva na prirodnyuyu sredu Severo-Zapadnogo regiona RF*. [The negative impact factor analysis to the environment from logging production on the North-West region of Russian Federation]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2023; 2 (50): 5-24. - DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>. (In Russ.). - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>.

17.Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the Far East. *Forest Science and Technology*. 2022; 18 (4): 190-200. - DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

18.Tampekis S., Kantartzis A., Arabatzis G., Sakellariou S., Kolkos G., Malesios C. Conceptualizing Forest Operations Planning and Management Using Principles of Functional Complex Systems Science to Increase the Forest's Ability to Withstand Climate Change. *Land*. 2024; 13(2):217. - DOI: <https://doi.org/10.3390/land13020217>

19.Piechowicz K., Szymanek S., Kowalski J., Lendo-Siwicka M. Stabilization of Loose Soils as Part of Sustainable Development of Road Infrastructure. *Sustainability*. 2024; 16(9):3592. - DOI: <https://doi.org/10.3390/su16093592>

20.Xing J., Sun S., Huang Q., Chen Z., Zhou Z. Application of Geoinformatics in Forest Planning and Management. *Forests*. 2024; 15(3):439. - DOI: <https://doi.org/10.3390/f15030439>

21.Van L.V., Tung N.T. Dynamic Load Determination of a Multi-purpose Forest Fire Fighting Vehicle When Operating on Forestry Road. *J. Vib. Eng. Technol.* 12, 3507–3517 (2024). - DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01061-w>

22.Borgonutdinov, A.M., Rudov, S.E., Grigoriev, I. V., Efimov, D. S., Shvetsova, V. V. (2022). *Eksperimental'nye issledovaniya teplovogo rezhima v sloyah dorozhnogo pokrytiya magistral'nyh lesovoznyh dorog*. [Experimental studies of the thermal regime in the road surface layers of main logging roads]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest magazine.]* (2), 146-158. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48211757>

Сведения об авторах

✉ *Степанов Артем Валерьевич* – кандидат технических наук, зав. кафедрой технологии и организации строительства ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>, e-mail: stepanov@petsu.ru.

Катаров Василий Кузьмич – кандидат технических наук, проректор по воспитательной и социальной работе ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>, e-mail: vkatarov@petsu.ru.

Сюнёв Владимир Сергеевич – доктор технических наук, проректор по научно-исследовательской работе ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>, e-mail: siounev@petsu.ru.

Колесников Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительства ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>, e-mail: kgn@petsu.ru.

Information about the authors

✉ *Artyom V. Stepanov* – Cand. Sci. (Technology), Head of the Department of Technology and Organization of Construction, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4495-6883>, e-mail: stepanov@petsu.ru.

Vasiliy K. Katarov – Cand. Sci. (Technology), Vice-Rector for Educational and Social Work, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6078-0691>, e-mail: vkatarov@petsu.ru.

Vladimir S. Syuneyev – Dr. Sci. (Technology), Vice-Rector for Research, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>, e-mail: iounev@petsu.ru.

Gennady N. Kolesnikov – Dr. Sci. (Technology), Professor at the Department of Technology and Organization of Construction, Petrozavodsk State University, Lenin Str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>, e-mail: kgn@petsu.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Влияние маневрирования движителя колесной лесной машины на ее проходимость в сложных геотехнических условиях

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>

Станислав И. Савченко³, savchenko.stas2020@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Сергей И. Ревяко⁵, revyako77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Павел Н. Перфильев⁶, p.perfilev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок, д. 5, 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, 185035, Российская Федерация

⁵ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, 346428, Российская Федерация

⁶ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Проведенное исследование направлено на решение актуальной научно-практической проблемы эксплуатации лесозаготовительной техники на переувлажненных почвах, которые характерны для более чем 60% территории лесного фонда Российской Федерации. Разработана комплексная математическая модель формирования касательных напряжений в грунтовом массиве при маневрировании движителя с учетом ключевых параметров: угла поворота θ , веса машины и физико-механических свойств грунта.

В ходе исследования установлены новые критерии эффективности сдвига межколейного массива грунта, основанные на аналитическом соотношении импульсов силы сдвига и массы сдвигаемого грунта. Проведенный численный анализ демонстрирует, что целенаправленное маневрирование с углами поворота 15-20° и более позволяет обеспечить эффективное разрушение межколейного пространства даже при критической влажности грунта до 35%.

Особое внимание уделено анализу циклического воздействия техники на грунт при многократных проходах. Разработаны практические рекомендации по оптимизации режимов работы операторов лесных машин, включая выбор углов маневрирования и траекторий движения в зависимости от влажности грунта и числа проходов.

Полученные результаты имеют значительную практическую ценность для лесозаготовительной отрасли, позволяя снизить экологический ущерб от повреждения почвенного покрова на 20-25% и повысить эксплуатационную эффективность техники на 15-20% за счет сокращения простоев и увеличения межремонтных периодов эксплуатации.

Ключевые слова: лесные машины, маневрирование лесных машин, деформация почвогрунта, образование колеи, геотехнические условия

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние маневрирования движителя колесной лесной машины на ее проходимость в сложных геотехнических условиях / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, С. И. Савченко, Е. А. Тихонов, С. И. Ревяко, П. Н. Перфильев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 3 (59). – С. 228–244. – Библиогр.: с. 241–243 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/15>



Поступила 14.02.2025 *Пересмотрена* 22.06.2025 *Принята* 15.09.2025 *Опубликована онлайн* 25.09.2025

Article


The effect of maneuvering the propulsion of a wheeled forestry vehicle on its maneuverability in difficult geotechnical conditions

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>

Stanislav I. Savchenko³,  savchenko.stas2020@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tikhonov@petrsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Sergey I. Revyako⁵, revyako77@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Pavel N. Perfiliev⁶, p.perfilev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

¹ St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Institutsky Lane, 5, 194021, Russian Federation

² Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, 677007, Russian Federation

³ Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, Timiryazev str., 8, 394087, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185035, Russian Federation

⁵ Novochoerkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov is a branch of the Don State Agrarian University, 111 Pushkinskaya str., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation

⁶ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

The conducted research is aimed at solving the urgent scientific and practical problem of the operation of logging equipment on waterlogged soils, which are typical for more than 60% of the territory of the forest fund of the Russian Federation. A complex mathematical model has been developed for the formation of tangential stresses in a soil mass during propulsion maneuvering, taking into account key parameters: the angle of rotation, the weight of the machine, and the physical and mechanical properties of the soil.

In the course of the study, new criteria for the effectiveness of shifting the inter-track mass of soil were established, based on the analytical ratio of the shear force pulses and the mass of the shifted soil. The numerical analysis

demonstrates that targeted maneuvering with rotation angles of 15-20° or more makes it possible to ensure effective destruction of the inter-track space even at critical ground humidity up to 35%.

Special attention is paid to the analysis of the cyclic effect of machinery on the ground during multiple passes. Practical recommendations have been developed to optimize the operating modes of forest machinery operators, including the choice of maneuvering angles and driving trajectories depending on soil moisture and the number of passes.

The results obtained have significant practical value for the logging industry, making it possible to reduce environmental damage from soil cover damage by 20-25% and increase the operational efficiency of machinery by 15-20% by reducing downtime and increasing maintenance periods.

Keywords: *forest machinery, maneuvering of forest machinery, soil deformation, track formation, geotechnical conditions*

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

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

For citation: Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Savchenko S. I., Tikhonov E. A., Revyako S. I., Perfiliev P. N. (2025). The effect of maneuvering the propulsion of a wheeled forestry vehicle on its maneuverability in difficult geotechnical conditions. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 3 (59), pp. 228-244 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.3/15>

Received 14.02.2025 Revised 22.06.2025 Accepted 03.09.2025 Published online 25.09.2025

Введение

Быстрое и эффективное управление лесами при заготовке древесины в больших объемах требует использования лесозаготовительных транспортных средств, таких как трелевочные тракторы, харвестеры и форвардеры [1-3]. Эксплуатация лесозаготовительной техники на переувлажненных почвах представляет серьезную научно-практическую проблему для лесного комплекса РФ. Более 60 % территории лесного фонда Российской Федерации находится на почвогрунтах III и IV категории. Движение транспортной техники затрагивает от 10 до 70 % вырубленной площади, что может нанести за собой огромный риск повреждения лесной почвы и экосистемы в целом [3-7].

Почвы, характеризующиеся низкой несущей способностью и высокой влажностью $W > 30\%$, широко распространены в северных и заболоченных регионах, занимающих значительные площади лесфонда РФ. При росте эффективности и производительности тяжелых колесных машин на территориях с переувлажненной почвой неизбежно приводит к деформации и уплотнению грунта. Последствиями работы техники в таких условиях является

снижение продуктивности лесных участков при последующем лесовосстановлении, деградация почвенных экосистем, потеря эксплуатационных показателей (снижение проходимости техники) [8-12].

Уплотнение почвы приводит к образованию колеи, смешивая почвенные горизонты, растительность, порубочных остатков. При высокой влажности почвы $W > 30\%$, глубина колеи может достигать 0,3 – 0,5 м, и более, затрудняя работы техники. Степень и масштаб образования колеи во время механизированных лесозаготовительных операциях часто зависит от типа и характеристик систем заготовок, количества проходов машин, уклона местности, типа почвы [12-14].

Проблема минимизации ущерба почвогрунтам при лесозаготовках активно исследуется. Основные подходы включают оптимизацию конструкции движителей, использование гусениц, или снегоходов, сезонное ограничение работ и применение технологий с малой площадью контакта [14-17].

Вопрос маневрирования движителя на переувлажненных почвах изучен недостаточно. Существующие модели взаимодействия «двигатель-

грунт» фокусируются преимущественно на прямолинейном движении и на начальном этапе деформации. В работе *Laschi A* были проанализированы экологические последствия лесозаготовок в кустарниковых насаждениях Италии. Было показано, что при влажности почвы 28-32% использование шин низкого давления снижает глубину колеи на 18%, но не предотвращает образование межколейного пространства. Автор отметил необходимость разработки методов активного управления деформациями путем изменения траектории движения, количественных моделей предложено не было [16]. Исследования *Naghdi R* выявили снижение уплотнения почвы на 15 % при зигзагообразном движении на склон, однако эксперимент проводится на грунтах с влажностью почвы менее 25 %, где проблема межколейного выступа не актуальны [17]. Теоретический анализ Анисимова Г. М. показал снижение среднего контактного давления при криволинейном движении, но в работе не были рассмотрены касательные напряжения сдвига $\tau_{r\theta}$, ключевые для разрушения выступа [24]. При анализе литературы были сделаны выводы о недостатке исследований количественных критериев эффективности различных видов маневрирования для сдвига межколейного пространства.

Целью исследования является разработка теоретических обоснованных рекомендаций по повышению проходимости колесных лесных машин на переувлажненных грунтах за счет оптимизации режимов маневрирования движителя, направленных на разрушение межколейного пространства и продления срока службы трелевочных волоков.

Для достижения цели были поставлены задачи по разработке математической модели формирования касательных напряжений в массиве грунта при маневрировании движителя с учетом угла поворота θ , веса машины и свойств грунта. Установлены критерии эффективности сдвига межколейного массива грунта, основаны на соотношении импульсов силы сдвига и массы сдвигаемого грунта. Проведен численный анализ влияния параметров на глубину колеи h_k и выполнения критерия сдвига. Определен оптимальный диапазон углов маневрирования θ обеспечивающий эффективное разрушение межколейного пространства.

Полученные результаты позволяют научно обосновать рекомендации для операторов лесных машин по выбору маневрирования при работе на переувлажненных грунтах. Результаты помогут снизить экологический ущерб, повысить эксплуатационную эффективность

Материалы и методы

Геометрические размеры сдвигаемого массива почвогрунта составляют: ширина L_u равна ширине L_b колесной базы за минусом удвоенной ширины $L_{ш}$ шин, высота равна глубине колеи h_k , длина - длине пятна контакта L_n .

Принимая во внимание значения параметров: $L_u \approx 1,4$ м (при $L_b = 3$ м и $L_{ш} = 0,8$ м), $h_k = 0,3-0,5$ м и $L_n = 0,4-0,5$ м, сдвигаемый объем V_k может достигать $0,3$ м³, а масса M_k превысит $0,3$ т при плотности ρ влажного почвогрунта более 1000 кг/м³.

Такие параметры сдвигаемого массива требуют формирования в его краевой части в границах трелевочного волока (технологического коридора) соответствующих касательных напряжений τ от действия сосредоточенной нагрузки Q , равной весу лесной машины или трелевочной системы.

Многочисленные проходы движителя по одному и тому же участку трелевочного волока лишь усугубляют проблему, поскольку глубина колеи h_k постоянно увеличивается, что приводит к постоянному росту значений V_k и M_k .

Необходимо отметить, что наряду с позитивным действием в контексте данной проблемы маневрирование оказывает и негативное влияние на массив почвогрунта в зоне корневой системы подроста и оставляемых на дорастивание деревьев (при выборочных рубках, или иных лесохозяйственных мероприятиях), что необходимо учитывать при проектировании охранных полос трасс движения лесных машин.

Результаты

В основу математической модели для определения величины τ положены результаты исследований [18, 19].

Пусть задана подвижная система координат xOy с центром в точке O приложения нагрузки Q .

Ось z направим перпендикулярно вниз к поверхности трассы движения лесной машины, ось x - вдоль нее и ось y - перпендикулярно направлению движения лесной машины.

Сосредоточенная сила Q , направленная вдоль оси z , оказывает вертикальное давление на почвогрунт $q_6 = Q/S_{II}$, где S_{II} – площадь пятна контакта движителя с поверхностью движения. В случае, если лесосечные или лесохозяйственные работы производят на склонах с углом наклона α к линии горизонта, то в качестве вертикальной силы принимают составляющую веса в виде $Q \cdot \cos \alpha$ [20,21].

Сила распора формирует в направлении оси y горизонтальные напряжения сдвига $\tau_c = \frac{\nu}{1-\nu} q_6$, где ν – коэффициент Пуассона. Под совокупным действием вертикальных и горизонтальных напряжений при превышении определенного предела прочности почвогрунта формируется зона разрушения с образованием колеи глубиной h_k .

При маневрировании движителя процесс деформирования почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $zr\theta$ с вертикальной z , радиальной r и тангенциальной θ координатами.

Компоненты тензора напряжений в этом случае при возникновении в момент поворота дополнительных касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ определяются как:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_1; \\ \sigma_r &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta. \quad (1)\end{aligned}$$

Из (1) следует, что при отсутствии поворота ($\theta=0$) компоненты тензора напряжений являются главными:

$$\sigma_z = \sigma_1, \sigma_r = \sigma_2, \sigma_\theta = \sigma_3, \tau_{r\theta} = 0, \quad (2)$$

которые в соответствии с [1, 2] равны:

$$\sigma_z = -\frac{3Q}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2}, \quad (3a)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\}, \quad (3b)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right\}. \quad (3b)$$

Как видим, определяющими параметрами при оценке напряжений являются величина нагрузки Q и коэффициент Пуассона ν .

Реализация математической модели (1)-(3) в диапазоне изменения параметров $Q=8-20$ т и $\nu=0,2-0,4$ для центра приложения нагрузки ($z=0$) позволили (рисунок 1) установить характер затухания дополнительных касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, кПа по мере роста r , м, т.е. удаления от границы трелевочного волока (технологического коридора).

Расчеты произведены при фиксированных значениях параметров $Q=14$ т и $\nu=0,32$ и различных углах поворота $\theta=10^\circ$, $\theta=20^\circ$, и $\theta=30^\circ$.

Как следует из анализа данных рисунка 2, при маневрировании с большими углами поворота движителя дополнительные касательные напряжения в непосредственной близости от центра приложения нагрузки возрастают кратно. Однако, по мере удаления от границы трелевочного волока (технологического коридора) они резко снижаются по закону затухающей экспоненты. На расстоянии, превышающем 0,5 м, влияние параметра θ на формирование величины $\tau_{r\theta}$ снижается.

Численные эксперименты модели (1)-(3) при $z=0$ в указанных выше диапазонах изменения параметров $Q=8-20$ т и $\nu=0,2-0,4$ позволили установить обобщенное регрессионное уравнение для определения величины дополнительных касательных напряжений в момент поворота движителя:

$$\tau_{r\theta} = 0,018 \cdot Q \cdot \cos \alpha (1-2\nu) \cdot (7,0178\theta + 0,633) \cdot e^{-4,372r}. \quad (4)$$

Суммируя горизонтальные напряжения сдвига τ_c с величиной $\tau_{r\theta}$, получим результирующую величину касательных напряжений τ в направлении сдвигаемого массива между колеями:

$$\tau = \tau_c + \tau_{r\theta}. \quad (5)$$

При погружении колеса радиусом R в почвогрунт на глубину колеи h_k площадь сектора S_k взаимодействия колеса с массивом почвогрунта равна:

$$S_k = \frac{R^2}{2} (\mu - \sin \mu), \quad (6)$$

где центральный угол $\mu = 2 \arccos(1 - h_k/R)$.

Сила сдвига F_c будет равна произведению величины τ на S_k :

$$F_c = (\tau_c + \tau_{r\theta}) \cdot \frac{R^2}{2} (\mu - \sin \mu). \quad (7)$$

За время t воздействия силы F_c на участок сдвигаемого массива почвогрунта возникает импульс силы сдвига:

$$I_c = F_c \cdot t. \quad (8)$$

Масса сдвигаемого массива с учетом плотности почвогрунта ρ равна:

$$M_k = \rho L_{ц} h_k L_{п}. \quad (9)$$

Импульс массы тела I_m при его перемещении со скоростью v составит:

$$I_m = M_k \cdot v. \quad (10)$$

Критерием выполнения сдвига массива почвогрунта между колеями в момент маневрирования движителя принимается условие превышение импульса силы сдвига, действующей на участок массива, над импульсом его массы:

$$I_c > I_m, \text{ н} \cdot \text{с} \quad (11)$$

Анализ соотношений для определения величин импульсов силы и массы показывает, что основными факторами влияния являются глубина колеи h_k , вес Q и коэффициент Пуассона ν , которые существенно зависят от влажности грунта W [20,21].

Произведем численные расчеты при следующих исходных данных: вес лесной машины (трелевочной системы) $Q=14$ т, радиус колеса - $R=0,625$ м, скорость движения - $v=0,6$ м/с, время взаимодействия - $t=8$ с, длина пятна контакта - $L_n=0,42$ м, ширина пятна контакта - $B_{п}=0,73$ м, площадь пятна контакта - $S_{п}=0,3066$ м², площадь сектора взаимодействия - $S_k=0,41$ м² (1/3 площади колеса).

Грунт - влажный суглинок с модулем общей деформации $E=1$ МПа, плотностью $\rho=1100$ кг/м³, соответствующей коэффициенту пористости 0,7 и влажности $W_n=28\%$, равной ее пределу пластичности. При иной влажности грунта W плотность корректировалась в соответствии с коэффициентом пропорциональности λ_W :

$$\lambda_W = \frac{1+W/100}{1+W_n/100}. \quad (12)$$

На рисунке 3 для влажности грунта $W=35\%$ и принятых исходных данных в результате выполненных расчетов показано влияние угла поворота θ , ° на величину глубины колеи h_k , м.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что существенный относительный рост h_k наблюдается при малых углах поворота до 10° (с 0,26 до 0,32 м) и по достижении θ уровней 15 и более градусов увеличение h_k происходит асимптотически.

Этот результат позволяет сделать предположение о том, что с ростом маневрирования импульс силы сдвига массива почвогрунта будет доминировать над импульсом его массы, что является пози-

тивным фактором в контексте решения поставленной проблемы повышения проходимости движителя при образовании глубокой колеи.

Важной характеристикой процесса упругопластического деформирования влажного почвогрунта с внутренним трением является коэффициент Пуассона ν , который зависит от влажности почвогрунта W .

На рисунке 3 представлены зависимости ν от W , %, где: кривая 1 – данные аппроксимации результатов исследований в работе [22] лабораторных испытаний [23] на образцах грунтов различной влажности; прямая 2 – расчетная, полученная как 1/100 от показателя W , %.

Как установлено, относительная погрешность оценки ν не выходит за пределы 3,5-4,5%.

На рисунке 5 а при маневрировании движителя с углом поворота $\theta=10^\circ$ показано влияние W (ось абсцисс, %) на значения (ось ординат, н·с) импульсов массы I_m - линия 1 и силы I_c - линия 2.

Как видно из рисунка 5 а во всем диапазоне изменения влажности условие (11) сдвига массива почвогрунта не выполняется.

Увеличив угол поворота θ до 20° (рисунок 4 б), условие (11) выполняется при любой влажности в диапазоне от ее предела пластичности $W_n=25-28\%$ до предела текучести $W_T=36-40\%$, причем с ростом W превышение импульса силы над импульсом массы растет, т.е. вероятность сдвига массива почвогрунта увеличивается.

Полученные результаты позволяют ввести безразмерный критерий эффективного сдвига, равный отношению импульсов:

$$G = \frac{I_c}{I_m}. \quad (13)$$

Условие (11) соответствует условию:

$$G > 1. \quad (14)$$

На рисунке 6 при принятых исходных данных и фиксированной влажности почвогрунта $W=32\%$ показано влияние угла поворота θ , на величину критерия G .

Как видим, при маневрировании с углами поворота, превышающими 20 градусов, вероятнее всего, что массив почвогрунта между колеями будет сдвинут на полную ширину межколейного пространства.

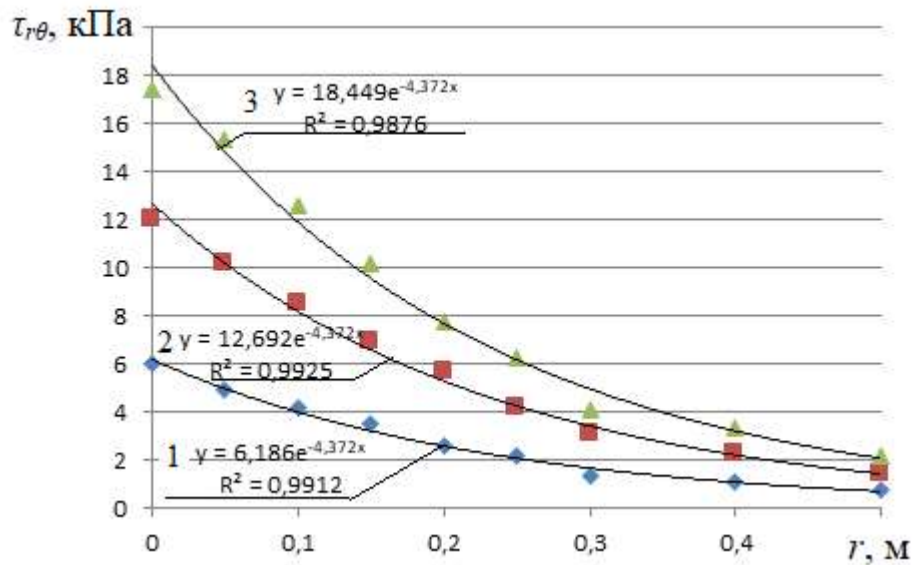


Рисунок 1. Изменение касательных напряжений в момент поворота с удалением от границы трелевочного волока (технологического коридора)

1 - $\theta=10^\circ$; 2 - $\theta=20^\circ$; $\theta=30^\circ$

Figure 1. Change in tangential stresses at the moment of rotation with distance from the boundary of the skidding portage (technological corridor)

1 - $\theta=10^\circ$; 2 - $\theta=20^\circ$; $\theta=30^\circ$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На рисунке 1 математическое моделирование подтвердило экспоненциальный характер затухания касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ с высокой точностью аппроксимации $R^2 > 0,98$, при удалении от точки контакта движителя с грунтом. При увеличении угла поворота θ с 10° до 30° возрастает пиковое напряжение в 3 раза с 6,2 до 18,4 кПа., однако угол поворота движителя $\theta = 20^\circ$ показывает усиленное затухание и коэффициент затухания равняется $k =$

5.752 м^{-1} , что снижает сдвиг почвы на расстояниях $r > 0,3 \text{ м}$. Оптимальные результаты по минимизации колеи $h_k \leq 0,26 \text{ м}$ и обеспечиванию условия сдвига $I_c > I_m$ достигнуты при $\theta = 25 - 30^\circ$, где сочетается высокая амплитуда напряжений и умеренный коэффициент затухания $k = 4.372 \text{ м}^{-1}$, осуществляя равномерное деформирование межколейного пространства.

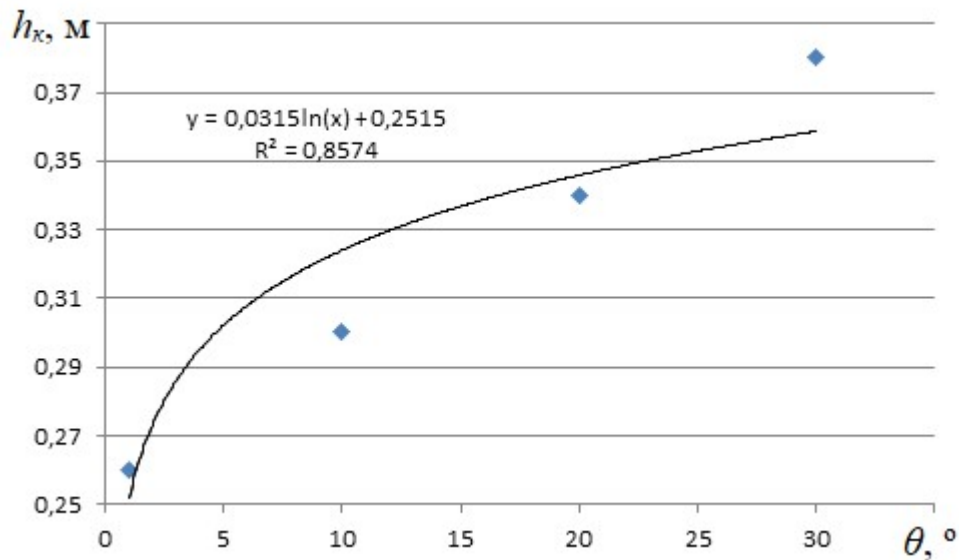


Рисунок 2. Влияние угла поворота движителя на глубину колеи
Figure 2. The effect of the angle of rotation of the propulsor on the depth of the track

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Анализ экспериментальных данных, представленных на рисунке 2, выявил выраженную логарифмическую зависимость глубины образующейся колеи (h_k) от угла поворота движителя (θ). Полученная зависимость аппроксимируется уравнением регрессии:

$$h_k = 0.0315 \cdot \ln(\theta) + 0.2515$$

с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0.8574$, что свидетельствует об адекватности выбранной математической модели.

Динамика процесса характеризуется двумя отчетливыми режимами:

При малых углах поворота ($\theta < 10^\circ$) наблюдается интенсивный рост глубины колеи до значений порядка 0.32 м. Данное явление обусловлено возникновением недостаточных касательных напряжений в контактной зоне ($\tau_{r\theta} \leq 6.2$ кПа), при которых критерий сдвига I_c не превышает порогового значения I_m ($I_c < I_m$). Это приводит к нарушению сплошности сдвига грунта и его активному накоплению в межколеинном пространстве.

При углах поворота $\theta \geq 15^\circ$ кинетика процесса кардинально меняется: рост глубины колеи существенно замедляется. При $\theta = 20^\circ$ и $\theta = 30^\circ$ величина h_k достигает значений 0.33 м и 0.35 м соответственно. Подобная трансформация механизма взаимодействия объясняется значительным увеличением касательных напряжений ($\tau_{r\theta} = 12.4\text{--}18.4$ кПа), что обеспечивает выполнение условия эффективного сдвига: $I_c > I_m$.

Проведенный анализ позволяет идентифицировать маневрирование с углами поворота менее 10° как критический режим, провоцирующий быстрое развитие колеи, в особенности на переувлажненных грунтах. Напротив, диапазон углов $\theta = 15^\circ\text{--}25^\circ$ может быть определен как операционно-оптимальный, обеспечивающий баланс между минимизацией глубины колеи и поддержанием эффективного силового взаимодействия с грунтом.

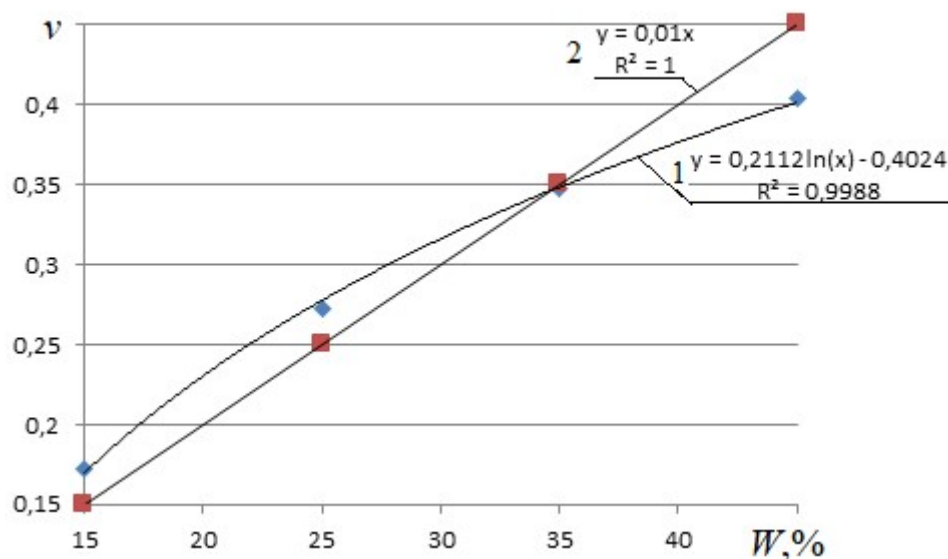


Рисунок 3. Зависимость коэффициента Пуассона от влажности W :

1 – данные аппроксимации результатов исследований в работе [5] лабораторных испытаний [6] на образцах грунтов различной влажности; 2 – расчетная, полученная как $1/100$ от показателя W , %

Figure 3. Dependence of the Poisson's ratio on humidity W :

1 – approximation data of the research results in [5] laboratory tests [6] on soil samples of various humidity;

2 – calculated as $1/100$ of the indicator W , %

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента Пуассона (ν) исследуемого грунта от его влажности (W). Экспериментально установленная зависимость имеет нелинейный S-образный характер, что свидетельствует о существенном расхождении с упрощенной линейной моделью.

Анализ показал, что при малых углах поворота управляемых колес ($\theta < 10^\circ$) применение линейной аппроксимации для прогнозирования сдвиговых деформаций приводит к систематическому завышению оценки на 8–15%. Данная методическая погрешность нивелирует учет дефицита импульса

силы, вследствие чего расчетная глубина колеи (h_k) может достигать 0,31 м. Указанное явление представляет наибольшую опасность при эксплуатации на склоновых территориях и переувлажненных грунтах.

При увеличении угла поворота до $\theta \geq 20^\circ$ маневрирование индуцирует рост касательных напряжений в контактном слое до значений 12–18 кПа. Данный режим обеспечивает выполнение критерия превышения импульса силы над импульсом момента ($I_s > I_m$), что лимитирует углубление колеи диапазоном 0,31–0,35 м.

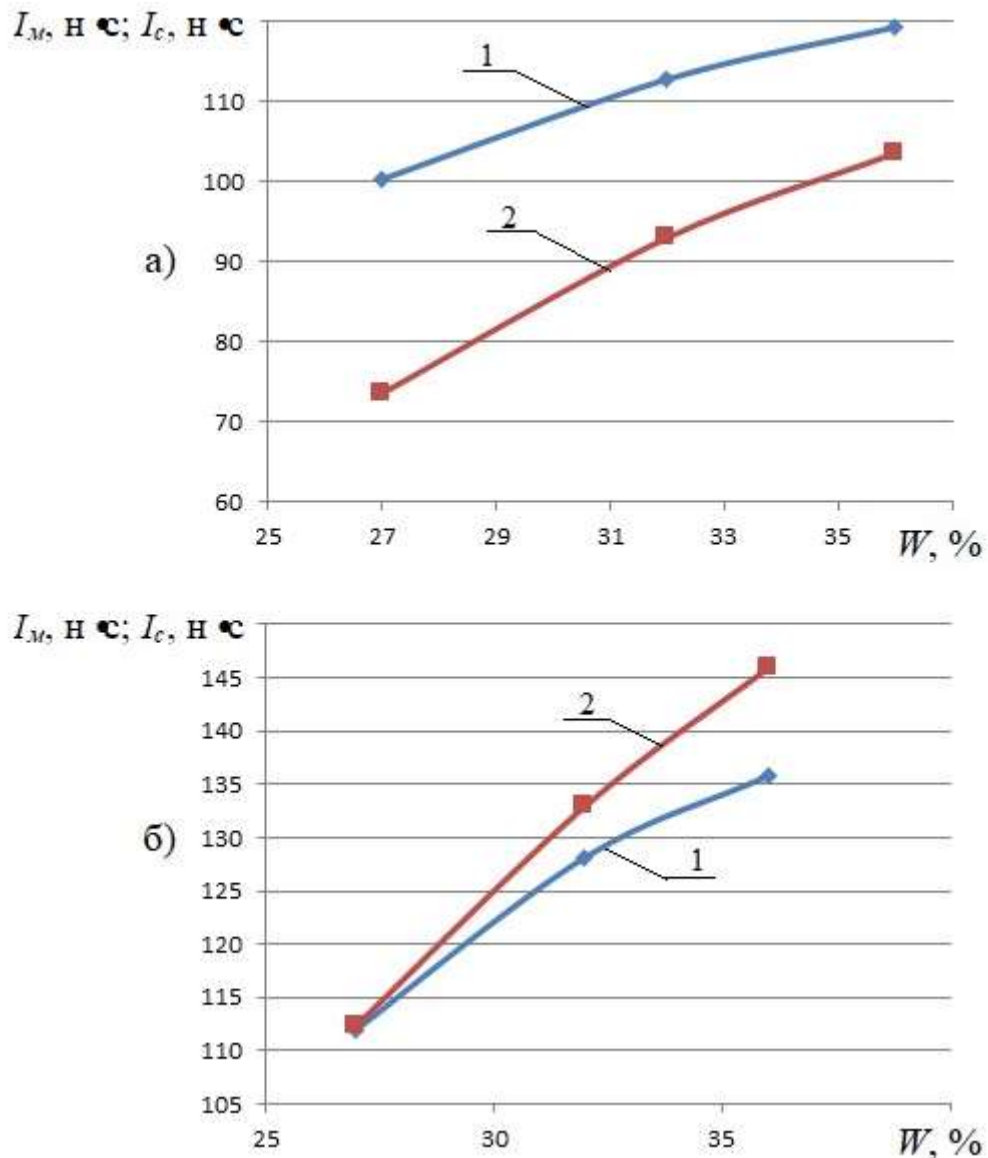


Рисунок 4. Зависимости импульса силы и импульса массы от влажности:

1 - импульс массы I_m ; 2 - импульс силы I_c

Figure 4. Force pulse and mass pulse dependences on humidity:

1 - momentum of mass I_m ; 2 - momentum of force I_c

Анализ зависимостей импульсов силы I_c и массы I_m от влажности грунта W (рисунок 4) подтверждает, что эффективность сдвига межколейного массива критически зависит от угла поворота движителя θ . При малых углах поворота $\theta < 10^\circ$ импульс силы I_c сохраняет инвариантность к изменению влажности почвы, тогда как импульс массы I_m возрастает с 68 до 80 Н·с при росте влажности от 25% до 35%, что увеличивают глубину колеи до 0.31 м. При углах $\theta > 20^\circ$ нелинейный рост импульсов

силы I_c с 110 до 125 Н·с компенсируются увеличением импульсом массы I_m с 105 до 130 Н·с, что коррелируют с фиксацией глубины колеи на уровне 0,33 м. Для переувлажнённых грунтов $W > 30^\circ$ маневры с углом поворота движителя $\theta < 15^\circ$ недопустимы из-за риска глубины колеи h_k , тогда как $\theta = 25^\circ - 30^\circ$ обеспечивает управление сдвигом даже при $W = 35\%$, что подтверждает ключевую роль угла поворота в компенсации негативного влияния влажности.

Обсуждение

Результаты исследований показывают, что увеличение веса Q с одной стороны приводит к росту глубины колеи, массы сдвигаемого массива почвогрунта и, соответственно, ее импульса, а с другой - способствует увеличению касательных напряжений и импульса силы сдвига.

На рисунке 6 для фиксированного значения $\theta=10^\circ$ показано влияние Q (ось абсцисс, т) на изменение критерия G (ось ординат).

Как видим, при незначительных углах поворота требуется большая нагрузка на массив почвогрунта для его сдвига в сторону от направления трелевочного волока (технологического коридора).

При меньшей нагрузке требуется более высокая маневренность в соответствии с данными рисунка 5.

Результаты исследования (рисунок 7) совместного влияния угла поворота движителя $\theta, ^\circ$ и его веса $Q, т$ на величину критерия сдвига G свидетельствуют о том, что чем более высокую нагрузку оказывает лесная машина или трелевочная система на почвогрунт, тем более значительное маневрирование необходимо для выполнения эффективной транспортной работы в сложных геотехнических условиях.

При многократных проходах лесной машины или трелевочной системы по одному и тому же участку колеи происходят:

1) циклическое уплотнение почвы в соответствии с прогнозными моделями [24] и

2) асимптотическое увеличение глубины колеи в соответствии с количественными оценками [25].

Основываясь на указанных методических положениях [24,25] и разработанных соотношениях (1)-(14) произведены расчеты показателей взаимодействия шины лесной машины с массивом почвогрунта между колеями при увеличении числа проходов с 1 до 4.

Расчеты соответствуют следующим исходным данным: влажность почвогрунта $W=32\%$, нагрузка на почвогрунт $Q=17 т$, глубина колеи после первого прохода ($N=1$) при $\theta=0^\circ$ равна $h_k=0,26 м$.

В таблицу 1 сведены данные глубины колеи h_k , м, импульсов массы I_m и силы I_c , кН·с.

На основании данных таблицы 1 определены (рисунок 7) значения критерия G по мере увеличения циклов прохода N .

Данные таблицы 1 и рисунка 7 позволяют произвести сравнительный анализ трех случаев:

первый – практически прямолинейное движение в условиях минимального маневрирования движителя (с углом поворота θ не более 5° – линия 1),

второй и третий - при маневрировании соответственно с $\theta=10^\circ$ – линия 2 и $\theta=15^\circ$ – линия 3.

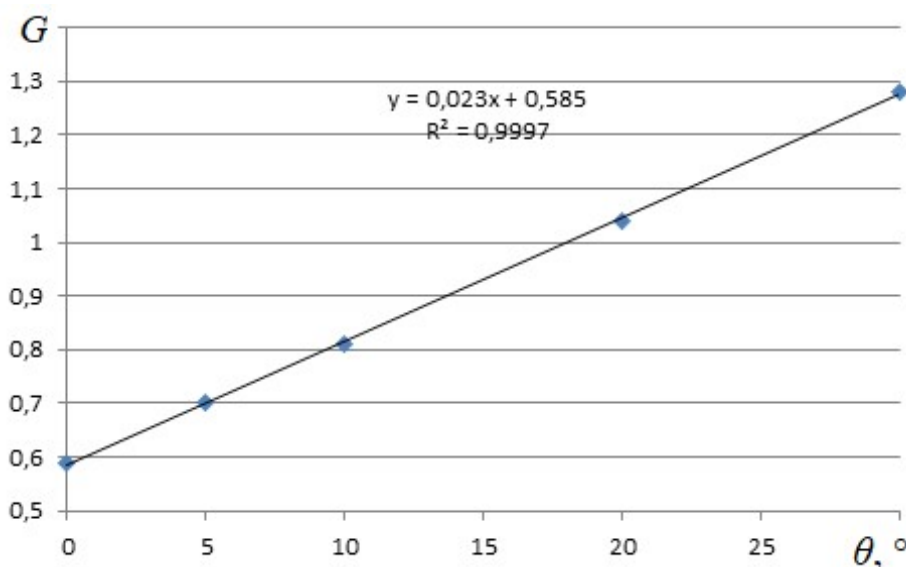


Рисунок 5. Влияние угла поворота движителя на величину критерия сдвига
Figure 5. The effect of the angle of rotation of the propulsor on the value of the shear criterion

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

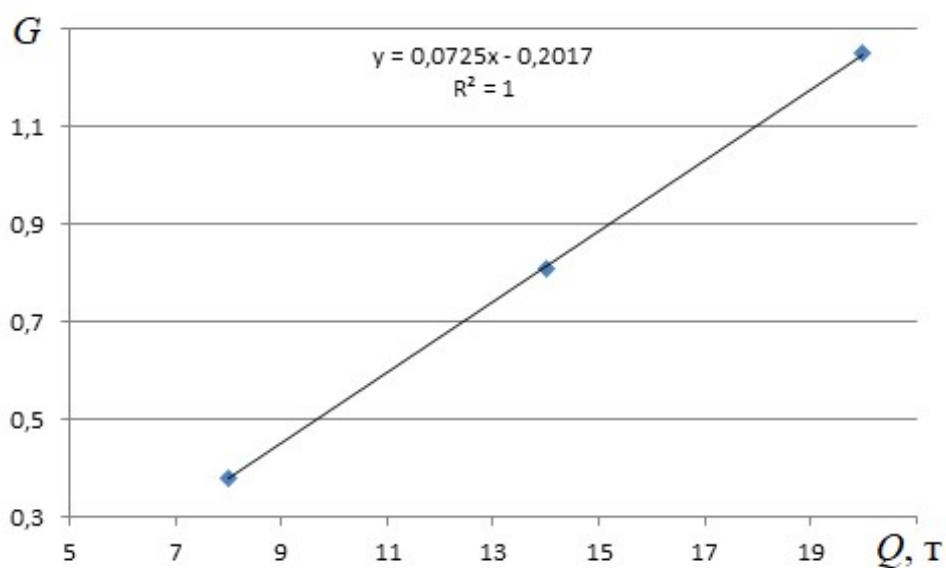


Рисунок 6. Влияние величины нагрузки на величину критерия сдвига

Figure 6. Influence of the load value on the value of the shear criterion

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 1. Результаты численного моделирования показателей взаимодействия лесной машины или трелевочной системы с массивом почвогрунта между колесами

Table 1. Results of numerical modeling of the interaction of a forest machine or a skidding system with an array of soil between the tracks

N	$\theta=5^\circ$			$\theta=10^\circ$			$\theta=15^\circ$		
	h_k	I_m	I_c	h_k	I_m	I_c	h_k	I_m	I_c
1	0,29	0,11	0,10	0,31	0,12	0,13	0,33	0,13	0,16
2	0,34	0,16	0,13	0,37	0,17	0,16	0,39	0,18	0,19
3	0,37	0,19	0,15	0,40	0,20	0,18	0,42	0,21	0,22
4	0,39	0,21	0,16	0,42	0,23	0,19	0,44	0,24	0,23

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

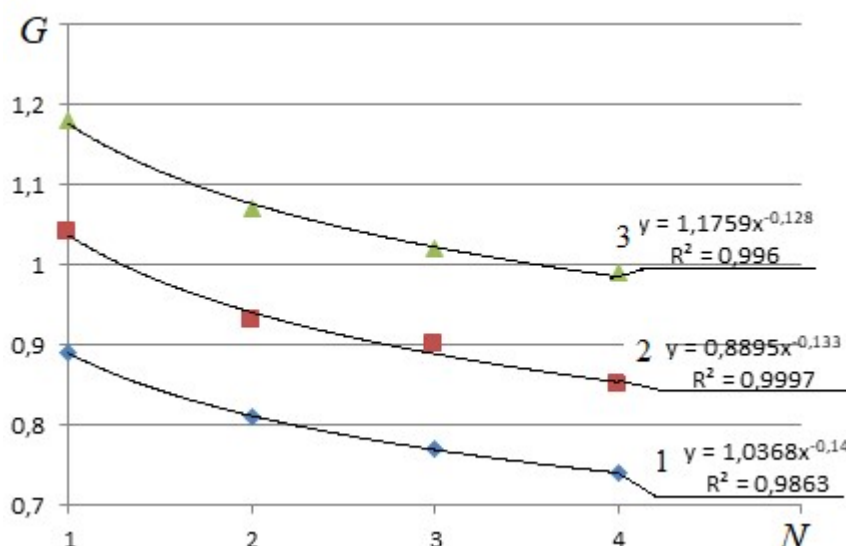


Рисунок 7. Влияние цикличности на изменение величины критерия сдвига
Figure 7. The effect of cyclicity on the change in the magnitude of the shift criterion

Закключение

Проведенное исследование позволило разработать теоретически обоснованные рекомендации по повышению проходимости колесных лесных машин на переувлажненных грунтах за счет оптимизации режимов маневрирования движителя. Установлено, что:

1. Маневрирование с углами поворота 15-20° и более обеспечивает формирование достаточных касательных напряжений для эффективного сдвига межколейного массива грунта.
2. Разработанный критерий эффективности сдвига, основанный на соотношении импульсов силы и массы, позволяет количественно оценить вероятность разрушения межколейного пространства.

3. Многократные проходы техники по одному участку требуют увеличения углов маневрирования для поддержания работоспособности трелевочных волоков.
4. Полученные результаты позволяют минимизировать глубину колеи (до 0,33-0,35 м) даже при высокой влажности грунта (до 35%) и многократных проходах техники.

Результаты исследования имеют практическую значимость для операторов лесозаготовительной техники и могут быть использованы при разработке руководств по эксплуатации машин в сложных грунтовых условиях, что позволит снизить экологический ущерб и повысить эффективность лесозаготовительных работ.

Список литературы

1. Groot R, Brander L, van der Ploeg S, Costanza R, Bernard F, Braat L, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst Serv.* 2012; 1:50–61. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
2. Holden SR, Treseder KK. A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances. *Front Microbiol.* 2013; 4:163. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2013.00163>
3. Lidskog R, Sundqvist G, Kall A-S, Sandin P, Larsson S. Intensive forestry in Sweden: stakeholders' evaluation of benefits and risk. *J Integr Environ Sci.* 2013; 10:145–60. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/1943815X.2013.841261>
4. Acharya RP, Maraseni T, Cockfield G. Global trend of forest ecosystem services valuation – an analysis of publications. *Ecosyst Serv.* 2019; 39:100979. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979>
5. Frey B, Kremer J, Rüdter A, Sciacca S, Matthies D, Lüscher P. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *Eur J Soil Biol.* 2009; 45:312–20. – DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2009.05.006>
6. Picchio R, Neri F, Petrini E, Verani S, Marchi E, Certini G. Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *For Ecol Manage.* 2012; 285:38–43. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.008>
7. Vossbrink J, Horn R. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *Eur J For Res.* 2004; 123:259–67. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-004-0040-8>
8. Horn R, Vossbrink J, Peth S, Becker S. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *For Ecol Manage.* 2007; 248:56–63. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.037>
9. Ramantswana M, Guerra SPS, Ersson BT. Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. *Curr For Rep.* 2020; 6:143–58. – DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-020-00114-7>
10. Cambi M, Certini G, Neri F, Marchi E. The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *For Ecol Manage.* 2015; 338:124–38. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
11. Powers RF, Andrew Scott D, Sanchez FG, Voldseth RA, PageDumroese D, Eliaf JD, et al. The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. *For Ecol Manage.* 2005; 220:31–50. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.003>
12. Agherkakli B, Najaf A, Sadeghi SH. Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. *J For Sci (Prague).* 2010; 56:278–84. – DOI: <http://dx.doi.org/10.17221/93/2009-JFS>
13. DeArmond D, Ferraz JBS, Emmert F, Lima AJN, Higuchi N. An assessment of soil compaction after logging operations in Central Amazonia. *For Sci.* 2020; 66:230–41. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz070>
14. Mariotti B, Hoshika Y, Cambi M, Marra E, Feng Z, Paoletti E, et al. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes- A meta-analysis. *For EcolManag.* 2020; 462:118004. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
15. Labelle ER, Kammermeier M. Above- and belowground growth response of *Picea abies* seedlings exposed to varying levels of soil relative bulk density. *Eur J Forest Res.* 2019; 138:705–22. – DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-019-01201-6>
16. Laschi A, Marchi E, González-García S. Forest operations in coppice: Environmental assessment of two different logging methods. *Sci Total Environ.* 2016; 562:493–503. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.041>
17. Naghdi R, Solgi A, Labelle ER, Nikooy M. Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in forest soil physical properties during ground-based skidding. *Pedosphere.* 2020; 30:508–16. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60428-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60428-4)
18. Анисимов Г.М., Большаков Б.М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: СПбГЛТА, 1998. 106 с.
19. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Дмитриев А.С., Григорьева О.И. Гео-техническое обоснование работоспособности трелевочных волоков и технологических коридоров на склонах,

оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колесным и полугусеничным двигателем // *Resources and Technology*. 2023. Т. 20, № 3. С. 15–31.

20. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020. № 2 (374). С. 101–117.

21. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пучнин А.Н. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // *Лесотехнический журнал*. 2019. Т. 9, № 1 (33). С. 116–128.

22. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2021. № 6 (384). С. 121–134.

23. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 228 с.

24. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнение почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2010. № 6 (111). С. 61–64.

25. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Жукова А.И. Модель циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // *Вестник КрасГАУ*. 2010. № 2 (41). С. 8–14.

References

1. Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., et al. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, *1*, 50–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

2. Holden, S. R., & Treseder, K. K. (2013). A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances. *Frontiers in Microbiology*, *4*, 163. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2013.00163>

3. Lidskog, R., Sundqvist, G., Kall, A.-S., Sandin, P., & Larsson, S. (2013). Intensive forestry in Sweden: stakeholders' evaluation of benefits and risk. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, *10*(2), 145–160. <http://dx.doi.org/10.1080/1943815X.2013.841261>

4. Acharya, R. P., Maraseni, T., & Cockfield, G. (2019). Global trend of forest ecosystem services valuation – an analysis of publications. *Ecosystem Services*, *39*, 100979. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979>

5. Frey, B., Kremer, J., Rüdte, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P. (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, *45*(4), 312–320. <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2009.05.006>

6. Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E., & Certini, G. (2012). Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *Forest Ecology and Management*, *285*, 38–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.008>

7. Vossbrink, J., & Horn, R. (2004). Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. *European Journal of Forest Research*, *123*(3), 259–267. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-004-0040-8>

8. Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S., & Becker, S. (2007). Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*, *248*(1–2), 56–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.037>

9. Ramantswana, M., Guerra, S. P. S., & Ersson, B. T. (2020). Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. *Current Forestry Reports*, *6*, 143–158. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-020-00114-7>

10. Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest Ecology and Management*, *338*, 124–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>

11. Powers, R. F., Andrew Scott, D., Sanchez, F. G., Voldseth, R. A., Page-Dumroese, D., Eliof, J. D., et al. (2005). The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management*, *220*(1–3), 31–50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.003>

12. Agherkakli, B., Najaf, A., & Sadeghi, S. H. (2010). Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. *Journal of Forest Science (Prague)*, *56*(6), 278–284. <http://dx.doi.org/10.17221/93/2009-JFS>
13. DeArmond, D., Ferraz, J. B. S., Emmert, F., Lima, A. J. N., & Higuchi, N. (2020). An assessment of soil compaction after logging operations in Central Amazonia. *Forest Science*, *66*(2), 230–241. <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz070>
14. Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E., et al. (2020). Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, *462*, 118004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
15. Labelle, E. R., & Kammermeier, M. (2019). Above- and belowground growth response of *Picea abies* seedlings exposed to varying levels of soil relative bulk density. *European Journal of Forest Research*, *138*(4), 705–722. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-019-01201-6>
16. Laschi, A., Marchi, E., & González-García, S. (2016). Forest operations in coppice: Environmental assessment of two different logging methods. *Science of The Total Environment*, *562*, 493–503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.041>
17. Naghdi, R., Solgi, A., Labelle, E. R., & Nikooy, M. (2020). Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in forest soil physical properties during ground-based skidding. *Pedosphere*, *30*(4), 508–516. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60428-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60428-4)
18. Anisimov, G. M., & Bol'shakov, B. M. (1998). *Osnovy minimizatsii uplotneniia pochvy trelevochnymi sistemami* [Fundamentals of minimizing soil compaction by skidding systems]. SPbGLTA. (in Russ.)
19. Kaliashov, V. A., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., Dmitriev, A. S., & Grigor'eva, O. I. (2023). Geotekhnicheskoe obosnovanie rabotosposobnosti trelevochnykh volokov i tekhnologicheskikh koridorov na sklonakh ottaivaiushchikh pochvogruntov pri rabote lesnykh mashin s kolesnym i poligusenichnym dvizhitelem [Geotechnical justification of the performance of skidding trails and technological corridors on slopes of thawing soils during the operation of forest machines with wheeled and semi-tracked propulsion systems]. *Resources and Technology*, *20*(3), 15–31. (in Russ.)
20. Rudov, S. E., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., & Grigor'eva, O. I. (2020). Issledovanie protsessa razrusheniia merzlykh i ottaivaiushchikh pochvogruntov pri vozdeistvii trelevochnoi sistemy [Study of the process of destruction of frozen and thawing soils under the impact of a skidding system]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, (2)(374), 101–117. (in Russ.)
21. Rudov, S. E., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., Grigor'ev, M. F., & Puchnin, A. N. (2019). Osobennosti ucheta sostoianiia massiva merzlykh gruntov pri tsiklicheskom vzaimodeistvii s trelevochnoi sistemoi [Peculiarities of accounting for the state of the frozen ground mass during cyclic interaction with the skidding system]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, *9*(1)(33), 116–128. (in Russ.)
22. Rudov, S. E., Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Kunitskaia, O. A., & Grigor'eva, O. I. (2021). Modelirovanie vzaimodeistvii lesnykh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonakh [Modeling the interaction of forest machines with soil on slopes]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, (6)(384), 121–134. (in Russ.)
23. Tsytovich, N. A. (1983). *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Vysshaia shkola. (in Russ.)
24. Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Lepilin, D. V., & Zhukova, A. I. (2010). Modelirovanie uplotnenie pochvogrunta v bokovykh polosakh trelevochnogo voloka s uchetom izmenchivosti trassy dvizheniia [Modeling of soil compaction in the lateral strips of the skidding trail taking into account the variability of the route]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, (6)(111), 61–64. (in Russ.)
25. Shapiro, V. Ya., Grigor'ev, I. V., Rudov, S. E., & Zhukova, A. I. (2010). Model' tsiklicheskogo uplotneniia grunta v polosakh, prilagaiushchikh k trelevochnomu voloku [A model of cyclic soil compaction in strips adjacent to the skid trail]. *Vestnik KrasGAU*, (2)(41), 8–14. (in Russ.)

Сведения об авторах

Шапиро Владимир Яковлевич - доктор технических наук, профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru.

✉ *Савченко Станислав Игоревич* – преподаватель кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: savchenko.stas2020@yandex.ru

Тихонов Евгений Андриянович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru

Ревяко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины природообустройства» Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К.Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru

Перфильев Павел Николаевич – кандидат технических наук, зав. кафедрой лесопромышленных производств и обработки материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru

Information about the authors

Vladimir Ya. Shapiro - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru

Igor V. Grigorev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru

✉ *Stanislav I. Savchenko*, Lecturer at the Department of Forestry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: savchenko.stas2020@yandex.ru

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru

Sergey I. Revyako – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Environmental Management Machines" Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov - branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru

Pavel N. Perfiliev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Timber Industry and Materials Processing of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2025 Том 15 № 3 (59)

Подписано в печать 24.09.2025. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет 29.09.2025. Цена 1442 р.

Усл. печ. л. 30,75. Уч.-изд. л. 57,56. Тираж 1000 экз. Заказ 448

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

телефон (473) 253-72-90, факс (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

FORESTRY ENGINEERING JOURNAL

Scientific journal

2025 Vol. 15 № 3 (59)

Signed to be published 24.09.2025. Format 60×90 1/8.

Publication date 29.09.2025. Price 1442 rub.

Cond. print. sh. 30,75. Acc.-print. sh. 57,56. Printing 1000 copies. Order 448

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