

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1833 г.
Издается в серии ИВУЗ с 1958 г.
Выходит 6 раз в год

5

2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

МЕЛЕХОВ В.И. – гл. редактор, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БАБИЧ Н.А. – зам. гл. редактора, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БОГОЛИЦЫН К.Г. – зам. гл. редактора, д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
АНГЕЛЬСТАМ П. – зам. гл. редактора по европейскому направлению, д-р наук, проф. (Швеция, Скиннскаттеберг)
КОМАРОВА А.М. – отв. секретарь, канд. с.-х. наук (Россия, Архангельск)

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Гаврилова О.И., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Казаков Я.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Коновалов В.Ф., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Уфа)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Посыпанов С.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сёренсен У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Царев А.П., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Воронеж)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Щекалев Р.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833
Issued as part of the
“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958
Published bi-monthly

5

2025

EDITORIAL BOARD:

MELEKHOV V.I. – Editor-in-Chief, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BABICH N.A. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BOGOLITSYN K.G. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
ANGELSTAM P. – Deputy Editor-in-Chief of the European Department, PhD, Prof. (Sweden, Skinnskatteberg)
KOMAROVA A.M. – Executive Secretary, Candidate of Agriculture (Russia, Arkhangelsk)

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Gavrilova O.I., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kazakov Ya.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Konovalov V.F., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Ufa)
Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Posypanov S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Tsarev A.P., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Voronezh)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Shchekalev R.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>H.H. Do, T. Nguyen-Sy, T.P. Tran, T.D.U. Huynh, T.L.N. Nguyen.</i> Applying GIS to Manage the Current Status of Tree Pests and Diseases in Urban Environment (Da Nang, Socialist Republic of Vietnam)	9
<i>A.B. Манов, И.Н. Кутявин.</i> Структура и состояние древесного яруса коренных ельников притундровой зоны в бассейне Печоры	26
<i>И.А. Попкова, О.С. Залывская.</i> Биологическая деструкция древесины кленов в урбанизированной среде	42
<i>Е.С. Андреева, И.В. Богданова, Г.А. Сергеева.</i> Моделирование развития лесных пожаров с учетом пятнистых возгораний	55
<i>A.C. Лоренц, О.И. Григорьева, И.В. Григорьев.</i> Применение модульных иглофильтров для аккумуляции грунтовых вод при тушении лесных пожаров.....	68
<i>Н.В. Примаков.</i> Ясеневоые полезащитные лесные полосы Кореновского района Краснодарского края.....	81
<i>Г.Г. Терехов, Е.М. Андреева, С.К. Стеценко, Н.Н. Теринов.</i> Лесоводственная оценка 47-летних культур пихты сибирской на Среднем Урале....	92

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

<i>М.В. Драпалюк, Д.Ю. Дручинин, М.А. Попов.</i> Влияние конструктивных параметров рабочих органов лесного плуга на профиль формируемого линейного микроповышения поверхности	107
<i>В.Я. Шатино, О.А. Куницкая, В.А. Каляшов, И.С. Должиков, В.П. Друзьянова, Е.А. Тихонов.</i> Работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на многолетней мерзлоте	120
<i>M. Kiaei.</i> Planting Spacing and Variation in Mechanical Properties of Poplar Wood (<i>Populus deltoids</i>)	133
<i>A.C. Королев, Е.С. Шаранов, А.О. Быков, О.С. Егюшин.</i> Оценка физико-механических свойств древесины сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.) ультразвуковыми преобразователями разной частоты	143

*ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ
И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ*

- А.Р. Галиева, Е.В. Крякунова, Л.А. Мингазова, З.А. Канарская, А.В. Канарский, А.Г. Кузнецов.* Ферментативный гидролиз арабиногалактана древесины лиственницы сибирской..... 153
- Д.С. Плахина, Н.И. Богданович.* Активные угли из водорослевого остатка альгинатного производства, содержащего измельченную древесину 169

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- А.А. Парамонов, А.А. Карабан, В.А. Усольцев, И.В. Цветков, С.В. Третьяков, И.С. Цепордей.* Возрастная реверсия рангового распределения фракций наземной биомассы рода *Salix* L..... 180
- С.А. Денисов, З.Н. Домрачева, М.Н. Волдаев.* Лесоводственные основы технологий освоения товарных горельников после низовых пожаров 187
- О.П. Лебедева, Ю.В. Александрова, Н.А. Бабич.* Вариативность морфолого-биологических характеристик диаспор восточноазиатских представителей трибы *Maleae*, культивируемых в приарктическом регионе..... 198



CONTENTS

FORESTRY

<i>H.H. Do, T. Nguyen-Sy, T.P. Tran, T.D.U. Huynh, T.L.N. Nguyen.</i> Applying GIS to Manage the Current Status of Tree Pests and Diseases in Urban Environment (Da Nang, Socialist Republic of Vietnam)	9
<i>A.V. Manov, I.N. Kutyavin.</i> The Structure and Condition of the Tree Layer of Indigenous Spruce Forests of the Subtundra Zone in the Pechora River Basin	26
<i>I.A. Popkova, O.S. Zalyvskaya.</i> Biological Degradation of Maple Wood in an Urban Environment.....	42
<i>E.S. Andreeva, I.V. Bogdanova, G.A. Sergeeva.</i> Modeling Forest Fire Development Taking into Account Spot Fires	55
<i>A.S. Lorents, O.I. Grigoreva, I.V. Grigorev.</i> Application of Modular Wellpoints for Groundwater Accumulation during Forest Fire Extinguishing.....	68
<i>N.V. Primakov.</i> Ash Forest Shelterbelts of the Korenovsky District of the Krasnodar Territory	81
<i>G.G. Terekhov, E.M. Andreeva, S.K. Stetsenko, N.N. Terinov.</i> Silvicultural Assessment of 47-Year-Old Siberian Fir Crops in the Middle Urals.....	92

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

<i>M.V. Drapalyuk, D.Yu. Druchinin, M.A. Popov.</i> The Influence of the Design Parameters of Working Bodies of a Forest Plow on the Profile of the Formed Linear Microhill on the Surface.....	107
<i>V.Ya. Shapiro, O.A. Kunitskaya, V.A. Kalyashov, I.S. Dolzhikov, V.P. Druzyanova, E.A. Tikhonov.</i> Operability of Skidding Trails and Technological Corridors on Permafrost	120
<i>M. Kiaei.</i> Planting Spacing and Variation in Mechanical Properties of Poplar Wood (<i>Populus deltoids</i>)	133
<i>A.S. Korolev, E.S. Sharapov, A.O. Bykov, O.S. Egoshin.</i> Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) Wood Using Ultrasonic Transducers of Different Frequencies	143

*TECHNOLOGY OF CHEMICAL WOOD PROCESSING AND PRODUCTION
OF WOOD-POLYMER COMPOSITES*

- A.R. Galieva, E.V. Kryakunova, L.A. Mingazova, Z.A. Kanarskaya, A.V. Kanarsky, A.G. Kuznetsov.* Enzymatic Hydrolysis of Arabinogalactan from Siberian Larch Wood 153
- D.S. Plakhina, N.I. Bogdanovich.* Active Carbons from Algae Residue of Alginate Production Containing Groundwood 169

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- A.A. Paramonov, A.A. Karaban, V.A. Usoltsev, I.V. Tsvetkov, S.V. Tretyakov, I.S. Tsepordey.* Age Reversion of the Rank Distribution of Aboveground Biomass Fractions in the Genus *Salix* L. 180
- S.A. Denisov, Z.N. Domracheva, M.N. Voldaev.* Silvicultural Principles of the Technologies for the Management of Commercial Burnt Stands after Ground Fires..... 187
- O.P. Lebedeva, Yu.V. Aleksandrova, N.A. Babich.* Variability of Morphological and Biological Characteristics of the Diasporas of East Asian Representatives of the *Maleae* Tribe Cultivated in the Subarctic Region 198



Original article

УДК 574.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-9-25

Applying GIS to Manage the Current Status of Tree Pests and Diseases in Urban Environment (Da Nang, Socialist Republic of Vietnam)

Hong Hanh Do[✉], Candidate of Biology; ResearcherID: [KIB-9856-2024](https://orcid.org/0000-0001-8241-9267),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8241-9267>

Toan Nguyen-Sy, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAX-2279-2021](https://orcid.org/0000-0003-2519-5732),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2519-5732>

Thi Phu Tran, Candidate of Biology; ResearcherID: [KIB-9875-2024](https://orcid.org/0009-0005-0054-4387),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0054-4387>

Thi Diem Uyen Huynh, Candidate of Food Science; ResearcherID: [KHZ-0385-2024](https://orcid.org/0009-0002-4409-6799),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4409-6799>

Thi Ly Na Nguyen, Applicant; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6068-8286>

University of Technology and Education – The University of Danang, Cao Thang Str., 48, Hai Chau District, Da Nang, 550000, Vietnam; dohanh326@gmail.com[✉], nstoan@ute.udn.vn, ttpu@ute.udn.vn, htduyen@ute.udn.vn, nguyennh12012003@gmail.com

Received on May 6, 2024 / Approved after reviewing on August 9, 2024 / Accepted on August 11, 2024

Abstract. In urban environments, landscape plants play a crucial role. Greenery provides a fresh and vibrant atmosphere, reducing the monotony of rigid concrete structures. Planting trees and greenery in urban areas helps improve the quality of the environment by reducing air pollution, noise, and the urban heat island effect. This, in turn, improves air quality, as well as the physical and mental well-being of urban residents. This study aims to understand the status of pests and diseases affecting landscape plants and propose measures to manage, mitigate, and enhance their resilience in urban environments, with the further application of GIS technologies to develop a data system that will help manage landscape plants quickly and most efficiently. The study utilizes morphological comparison methods to classify plants and identify pests and diseases on landscape plants. In addition, GIS technology is applied for digitizing the collected data using Mapinfo Professional 15 software. The study has collected data on over 500 managed landscape plants along the major roads of Hai Chau District, Da Nang, resulting in the identification of 27 plant species and 12 types of pests and diseases affecting them. In general, the current status of landscape plants in the study area is favorable, pest and disease infestation is minimal. Only a few trees have been found to be leaning or at risk of falling, suggesting their removal and replacement with new trees. Based on the collected data, the authors have created a digitized greenery map of the study area.

Keywords: urban environment, GIS technology, Da Nang, landscape plants, pests, diseases

Acknowledgments: We are deeply grateful to Dr. Tran Hoang Hieu, Lecturer at the University of Economics, the University of Danang, Vietnam, (Associate Professor at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia), for his invaluable assistance in the statistical analysis in this paper.



For citation: Do H.H., Nguyen-Sy T., Tran T.P., Huynh T.D.U., Nguyen T.L.N. Applying GIS to Manage the Current Status of Tree Pests and Diseases in Urban Environment (Da Nang, Socialist Republic of Vietnam). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 9–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-9-25>

Научная статья

Применение геоинформационных систем для управления текущим статусом вредителей и болезней деревьев в городской среде (Дананг, Социалистическая Республика Вьетнам)

Хонг Хань До✉, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [KIB-9856-2024](https://orcid.org/0000-0001-8241-9267),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8241-9267>

Тоан Нгуен-Ши, канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [AAX-2279-2021](https://orcid.org/0000-0003-2519-5732),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2519-5732>

Тхи Фу Чан, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [KIB-9875-2024](https://orcid.org/0009-0005-0054-4387),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0054-4387>

Тхи Зиет Уиен Хуинь, канд. пиц. наук; *ResearcherID*: [KHZ-0385-2024](https://orcid.org/0009-0002-4409-6799),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4409-6799>

Тхи Ли На Нгуен, соискатель; *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0005-6068-8286>

Университет технологий и образования – Данангский университет, ул. Као Тханг, д. 48, район Хай Чау, г. Дананг, Вьетнам, 550000; dohanh326@gmail.com✉, nstoan@ute.udn.vn, ttphu@ute.udn.vn, htduyen@ute.udn.vn, nguyennh12012003@gmail.com

Поступила в редакцию 06.05.24 / Одобрена после рецензирования 09.08.24 / Принята к печати 11.08.24

Аннотация. В городских условиях ландшафтные растения играют решающую роль. Зелень создает свежую и яркую атмосферу, уменьшая монотонность бетонных конструкций. Посадка деревьев и кустарников в городских районах способствует улучшению качества окружающей среды за счет снижения уровней загрязнения воздуха, шума и эффекта острова тепла. Это, в свою очередь, улучшает качество воздуха, а также физическое и психологическое благополучие жителей. Настоящее исследование направлено на изучение вредителей и болезней, влияющих на ландшафтные растения, и предложение мер по уходу за пораженными растениями, повышению их устойчивости в городских условиях с дальнейшим применением ГИС-технологий для создания системы данных, которая поможет эффективно управлять растениями. Используются методы морфологического сравнения для классификации растений и выявления вредителей и болезней. Кроме того, технология ГИС применяется для оцифровки собранных данных с помощью программного обеспечения Mapinfo Professional 15. В ходе исследования получена информация о более чем 500 управляемых ландшафтных растениях вдоль основных дорог района Хай Чау г. Дананг, в результате чего было идентифицировано 27 видов растений и 12 типов вредителей и болезней. В целом современное состояние ландшафтных растений на территории исследования благоприятное, пораженность вредителями и болезнями минимальна. Обнаружено лишь несколько наклоненных деревьев, которые могут упасть, что позволяет предложить их удаление и замену новыми экземплярами. По итогам работы создана оцифрованная карта озеленения анализируемой территории.

Ключевые слова: городская среда, ГИС-технологии, Дананг, ландшафтные растения, вредители, болезни

Благодарности: Авторы глубоко признательны доктору Чан Хоанг Хьеу, преподавателю Данангского университета экономики (Вьетнам), доценту Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия), за его неоценимую помощь в статистическом анализе, представленном в этой статье.

Для цитирования: Do H.H., Nguyen-Sy T., Tran T.P., Huynh T.D.U., Nguyen T.L.N. Applying GIS to Manage the Current Status of Tree Pests and Diseases in Urban Environment (Da Nang, Socialist Republic of Vietnam) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 9–25. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-9-25>

Introduction

As urban areas continue to develop, the urban greenery system becomes increasingly important. Green plants are integral to architectural structures and are vital in climate regulation, environmental protection, and addressing ecological issues. The development of urban greenery can be likened to constructing “green lungs” for the city, helping regulate air quality in the face of increasing environmental pollution. The urban greenery system also serves as a focal point for residents’ recreational, leisure, and cultural activities.

Currently, countries are interested in applying GIS software in various fields. However, there is still limited research on the application of GIS in managing the current status of landscape plants, with only a few related studies available. For example, in Russia, GIS has been applied in such studies as “Application of GIS technologies in Monitoring and Assessing the Condition of Agricultural Land in the Kazakh Sector of the Caspian Sea” [14]; and “Landscape Zoning of the Sea of Azov Using Elements of GIS Technologies” [3]. In Germany, GIS technology has been utilized in the topics like “GIS in Landscape Planning” [24]. There is also a research project in India on “Applications of GIS in Plant Taxonomy, Species Distribution and Ecology” [29]. In the United States, GIS is used in tree management. Several tree management software programs have been developed, such as CANOPY (urban forest management planning, tree risk management policy, natural area restoration, consultation, tree conservation regulations, urban forest program auditing, tree inventory, GIS mapping) and SILVIBASE (tree inventory, inventory auditing, and reporting) [1]. In terms of research on the current status of landscape plants, there are several studies by scientists such as O.N. Ezhov [9], K. Tubby [30], and K.M. Vail [31]. Additionally, the study “Effectiveness of Poisonous Plants in The Fight with Pests and Diseases of Field and Garden Crops” by T.L. Chapalda explores the role of toxic plants in pest and disease control [4].

In recent years, the city of Da Nang has changed its urban landscape, particularly in its urban greenery system, which exhibits diversity in plant species. However, the urban environment is not optimal for plant growth, exacerbated by pollution and dust, leading to the proliferation of various pests and diseases in landscape plants. Meanwhile, there is a lack of comprehensive research on the current status of pests and diseases affecting urban plants in Vietnam. In 2016, a study titled “Applying Remote Sensing and GIS to Research and Evaluate the Current Status of Urban Greenery in Cau Giay District” [1] has been carried out and other related studies included into a research project in Hue in 2006 [12]. In Ho Chi Minh City,

in 2008, Dr. C.D. Ly led a research project titled “Building an Information System for Managing Street Trees and Parks in Ho Chi Minh City” [17]. In Da Nang there has also been a study titled “Applying GIS to Manage Shade Trees on Some Streets in Hai Chau District, Da Nang City” [25]. However, there has been limited attention regarding the current status of landscape plants, particularly the study of pests and diseases affecting them. Only a few studies have been carried out, such as “Composition and Basic Biological Characteristics of Ornamental Plant Pests of the Genus *Ficus* in Xuan Mai Area” [22], “Preventing Pests and Diseases of Ornamental Plants” [19] and “Current Status and Development Solutions Shade Trees for Street System in Thanh Hoa City” [10]. As for the landscape plants in the city of Da Nang, no specific research studies have been conducted thus far. Therefore, the current one aims to collect data to understand the occurrence of pests and diseases on urban plants in the city of Da Nang and propose methods to enhance the resilience of these plants in the urban environment. This will be achieved by applying GIS technology for data digitization, to support urban greenery management authorities.

Research Objects and Methods

Da Nang is located in a tropical monsoon climate zone, with high air temperatures (on average, 25 °C) and minimal fluctuations. There are 2 distinct seasons: the dry season from January to September and the rainy season from October to December. Occasionally, there are brief periods of intense cold, but they are not prolonged. The average air humidity is 83.4 %. Da Nang is a city with a rare diversity of landscapes and ecological environments, with landscapes changing from mountainous areas to deltas to coastal area regions. However, compared to 1997, the urban area of Da Nang has expanded about 4 times. This has led to an increasing narrowing of the urban tree area, along with the effects of urbanization on the living conditions of landscape trees such as changes in temperature, dust, noise, and the narrowing of the growing space for trees. The research has been conducted on landscape plants along several major roads in Hai Chau District, Da Nang, including Cao Thang, Thanh Son, Thanh Hai, Thanh Thuy, and Ly Tu Trong, totaling more than 500 trees. These landscape plants all grow under the environmental and climatic conditions of the city of Da Nang.

Firstly, a survey has been conducted in the study area, selecting roads with many landscape plants. The survey has aimed to determine the current health status of the trees, specifically identifying pests and diseases. A digital map has been established to monitor, manage, and implement remedial and care measures for the trees under study.

The comparative morphological method has been utilized for plant classification [2, 7]. This method relies on the external characteristics of the plant’s nutritional and reproductive organs. In classification, the study of reproductive organs is essential because its characteristics are closely related to the genetic code and are less influenced by environmental conditions. Comparing these characteristics and morphological features in classification is known as morphological comparison. Accordingly, plant classification is based on the morphological features of leaves, branches, flowers, bark, and stems, as described in the book “Ornamental Plants and Flowers of Vietnam” by T. Hop [11, 21].

The identification of pests and diseases affecting landscape plants based on their morphological characteristics is described in the book “Preventing Pests and Diseases of Ornamental Plants” [19], and the book “Preventing Pests and Diseases on Some Popular Flower Species” [8]. After obtaining the necessary data (pest samples, images of leaves damaged by pests, images of diseases on trees, etc.) the types of pests have been identified [6, 18]. Methods to improve plant resistance have been based on the studies by T. Hop [11, 21] and T.V. Mao et al. [19]. The method for determining the social status of trees according to the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) is based on the judicial and regulatory acts of the Russian Federation, specifically the Decree of the Russian Federal Forestry Agency dated 10.11.2011 no. 472 (as amended on 15.03.2018) “On the Approval of Methodological Recommendations for the Conduct of State Forest Inventory”.

GIS technology digitizes the collected data using Mapinfo Professional 15 software. The sequence of steps for establishing the database is as follows (Fig. 1) [15, 16].

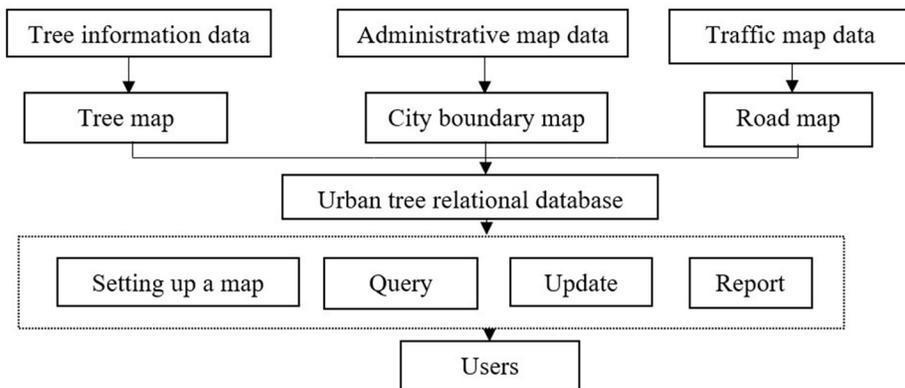


Fig. 1. The diagram of the database setup steps

After obtaining the green tree information database, the data has been collected on the administrative map, city boundaries, transportation, and road network maps. With the administrative and transportation maps, as well as green tree data in possession, the map has been georeferenced. Subsequently, the boundary map and transportation map have been created. Based on the obtained tree database, the next step has been to establish a tree map (Fig. 2).

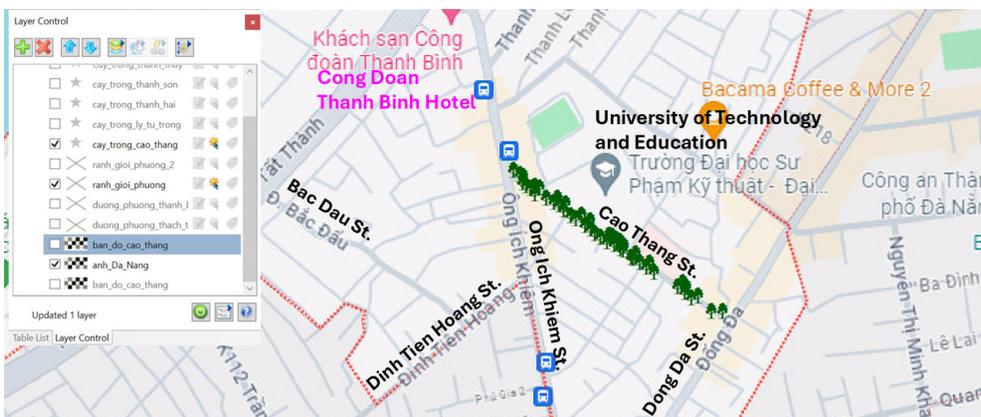


Fig. 2. Digitizing the information on the crop on Cao Thang Street

After digitization, the tree will be displayed on the screen when the mouse is moved to its location (Fig. 3).

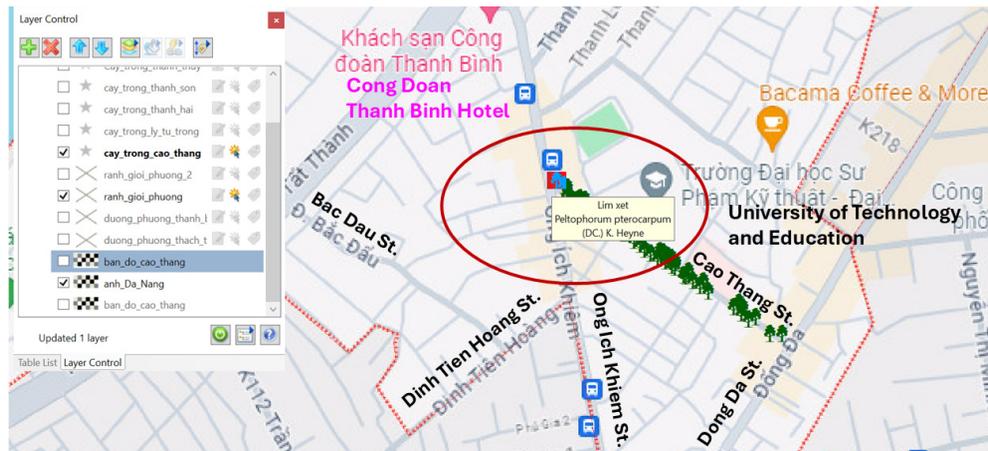


Fig. 3. Tree information on the tree displayed on the screen

After successful digitization, all the databases of coordinates, tree names, and tree statuses, such as pests, diseases, diameter (D), and height (H), are displayed by the software (Table 1). This helps the managers easily understand the crop's location and current status. And then it is also possible to update and change the data.

Table 1

An exapmle of the digitized tree data

No.	X coordinates	Y coordinates	Scientific name of the plant	Current status of pests and diseases on trees	Pests causing diseases in plants	D	H
1	108.21219700	16.07746900	<i>Terminalia catappa</i> L.	Leaves are eaten by worms and turn yellow	<i>Arna pseudo-conspersa</i> Strand	25.30	6
2	108.21225400	16.07742300	<i>Terminalia catappa</i> L.	Leaves are eaten by worms and turn yellow	<i>Arna pseudo-conspersa</i> Strand	21.70	9
3	108.21231000	16.07738900	<i>Terminalia catappa</i> L.	Leaves are eaten by worms, turn yellow and have leaf spots	<i>Arna pseudo-conspersa</i> Strand	20.00	10
...

After obtaining the dataset, calculations of the Average Diameter (AD), Average Height (AH), and the frequency of disease occurrence at each location are carried out via Python 3.13.0 software. With the help of Python software, statistical analysis (correlation analysis, logistic regression model, chi-squared test) is performed to examine the relationship between the presence of the disease and the tree location, as well as the diameter and height of the tree.

Correlation Analysis. Correlation analysis is a method of measuring the degree of correspondence between the orders of 2 random variables [13]. It helps to indicate the relationship between the occurrence of pests and the location of the crop [28].

Chi-Squared Test. The chi-squared test is a non-parametric statistical method used to analyze categorical data and assess the relationship between variables. In

this case, it is used to determine the statistical significance between the disease and the height and diameter of the tree [5, 26].

Logistic Regression Model. Logistic regression models are used to study the effects of predictor variables on classification outcomes, especially binary outcomes [23]. Logistic regression models have been effectively used to predict the occurrence of diseases and tree characteristics in various forest ecosystems. Studies have shown a relationship between tree bark beetle outbreaks and factors such as tree size, tree density, and topography [27]. The relationship between tree height-diameter and growth patterns has been modeled using logistic regression [20]. This study uses the logistic regression model to determine the relationship between the diameter, height, and the likelihood of tree disease infestation.

Results and Discussion

The List of the Planted Trees in the Study Area. Firstly, before commencing the process of digitizing the landscape tree map, it has been essential to obtain data on these trees. Consequently, an investigation and data collection regarding the current status of landscape trees in the study area have been performed. Based on the results of the survey conducted along Cao Thang, Ly Tu Trong, Thanh Hai, Thanh Son, and Thanh Thuy Streets, a general observation has been made that the landscape trees in the city undergo regular pruning before the rainy season to mitigate the occurrence of falling or breaking incidents. As a result, these trees exhibit an average height ranging from 5 to 10 m, with an average diameter of 20 to 25 cm. The classification of the trees along the streets above is presented in Table 2.

Table 2

The list of the trees planted in the study area

Order	Family	Genus	Species	Average diameter (AD, m)	Average height (AH, m)
Magnoliales	Magnoliaceae	<i>Magnolia</i>	<i>Magnolia</i> × <i>alba</i> (DC.) Figlar	17.0	6.8
Caryophyllales	Nyctaginaceae	<i>Bougainvillea</i>	<i>Bougainvillea glabra</i> Choisy	10.7	5.0
Ericales	Lecythidaceae	<i>Barringtonia</i>	<i>Barringtonia acutangula</i> (L.) Gaertn.	22.4	5.4
	Sapotaceae	<i>Mimusops</i>	<i>Mimusops elengi</i> L.	18.7	5.0
Rosales	Moraceae	<i>Artocarpus</i>	<i>Artocarpus altilis</i> (Parkinson) Fosberg	26.9	6.7
			<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	8.0	3.5
		<i>Ficus</i>	<i>Ficus racemosa</i> L.	24.1	4.8
			<i>Ficus bengalensis</i> L.	33.2	5.7
Fabales	Fabaceae	<i>Peltophorum</i>	<i>Peltophorum pterocarpum</i> (DC.) K. Heyne	28.0	7.5
		<i>Erythrina</i>	<i>Erythrina fusca</i> Lour.	24.5	5.0
		<i>Cassia</i>	<i>Cassia fistula</i> L.	22.8	9.3
		<i>Pterocarpus</i>	<i>Pterocarpus macrocarpus</i> Kurz	15.1	6.5

End of Table 2

Order	Family	Genus	Species	Average diameter (AD, m)	Average height (AH, m)
Fabales	Fabaceae	<i>Tamarindus</i>	<i>Tamarindus indica</i> L.	24.4	7.1
		<i>Samanea</i>	<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.	27.8	8.0
	Leguminosae	<i>Phanera</i>	<i>Phanera purpurea</i> (L.) Benth.	27.8	7.0
Myrtales	Combretaceae	<i>Terminalia</i>	<i>Terminalia catappa</i> L.	23.2	6.7
			<i>Terminalia mantaly</i> H.Perrier	20.4	5.2
	Lythraceae	<i>Lagerstroemia</i>	<i>Lagerstroemia speciosa</i> (L.) Pers.	23.7	5.1
Sapindales	Anacardiaceae	<i>Mangifera</i>	<i>Mangifera indica</i> Linnaeus	16.4	5.0
	Meliaceae	<i>Chukrasia</i>	<i>Chukrasia tabularis</i> M.Roem	24.4	5.8
		<i>Khaya</i>	<i>Khaya senegalensis</i> (Desr.) A. Juss.	23.4	5.7
Oxalidales	Oxalidaceae	<i>Averrhoa</i>	<i>Averrhoa carambola</i> L.	10.1	3.1
Gentianales	Apocynaceae	<i>Alstonia</i>	<i>Alstonia scholaris</i> L. R. Br.	26.0	6.4
		<i>Thevetia</i>	<i>Thevetia peruviana</i> (Pers.) K. Schum.	2.3	2.0
Lamiales	Bignoniaceae	<i>Spathodea</i>	<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	11.8	7.0
Arecales	Arecaceae	<i>Chrysalidocarpus</i>	<i>Chrysalidocarpus lutescens</i> H. Wendl	10.1	5.2
		<i>Washingtonia</i>	<i>Washingtonia filifera</i> (Lind.) H. Wendl	25.7	9.0

Thus, after conducting the surveys along Cao Thang, Thanh Son, Thanh Hai, Thanh Thuy, and Ly Tu Trong Streets, a catalog of 27 tree species has been compiled, totaling over 500 trees. The most commonly encountered species are *Peltophorum pterocarpum* (40 %), *Terminalia catappa* (20 %), and *Chukrasia tabularis* (10 %). The least frequently encountered ones are *Thevetia peruviana* (0.04 %), *Washingtonia filifera* (0.04 %), and *Artocarpus heterophyllus* (0.04 %).

The Catalog of Pests and Diseases in the Study Area. Once the catalog of landscape trees has been compiled, the next step has been to create a database on the pest and disease status of the trees. Following the investigation, a database has been gathered of pests and diseases affecting each tree along Cao Thang, Ly Tu Trong, Thanh Hai, Thanh Son, and Thanh Thuy Streets (Table 3). The trees have been sequentially numbered to correspond their respective locations, facilitating the process of constructing the green tree data map.

Table 3

The catalog of pests and diseases in the study area

Tree location	Scientific name of the plant	Pests causing diseases in plants
Thanh Thuy: 1, 2, 4, 5, 7, 11, 16, 18–20, 22, 26, 32–34, 36, 40, 41, 43, 44, 47, 53, 54, 57, 60, 77, 78, 85, 87, 99, 100, 105, 106, 110–113, 117, 122, 123, 128, 129, 131–133, 138, 139, 144, 145, 146, 148, 149, 151. Thanh Hai: 3, 4, 12, 14, 15, 16, 21–23, 29, 30, 34, 37, 43, 44, 46, 49, 51, 52 Thanh Son: 58, 79, 80, 82, 85, 86 Cao Thang: 26, 37, 44, 47 Ly Tu Trong: 1–7, 10–12, 15, 17–20, 23, 24, 28, 42, 43, 77, 88–100, 104–106.	<i>Peltophorum pterocarpum</i> (DC.) K. Heyne	<i>Pericyma cruegeri</i> Butler
Thanh Thuy: 3, 10, 28, 82, 142	<i>Ficus racemosa</i> L.	<i>Gynaikothrips uzeli</i> Zimmerman
Thanh Hai: 6 Thanh Son: 8, 10	<i>Ficus bengalensis</i> L.	<i>Ocinara varians</i> Walker
Thanh Thuy: 8, 9, 37, 38, 46, 61, 62, 80, 81, 89, 90, 124, 125, 136, 137 Thanh Hai: 7–9, 31, 32, 41, 47, 48 Thanh Son: 9, 50, 64, 65, 74 Cao Thang: 11, 21, 24, 43 Ly Tu Trong: 40, 41, 44, 45, 69, 82, 83, 112	<i>Barringtonia acutangula</i> (L.) Gaertn.	<i>Pestalotia</i> sp
Thanh Thuy: 12, 50–52, 75, 76, 79, 91, 104, 115, 116, 140, 141, 147 Thanh Hai: 5, 6, 17, 18, 20, 25, 35, 36, 45 Thanh Son: 1, 3, 4, 6, 11–13, 41–43, 51, 52, 62, 73 Cao Thang: 1–5, 9, 10, 19, 25, 31, 34, 36, 42 Ly Tu Trong: 8, 9, 37–39, 60–62, 70, 71, 80, 109, 110, 111	<i>Terminalia catappa</i> L.	<i>Arna pseudoconspersa</i> Strand
Thanh Thuy: 13, 48, 71, 94, 95 Thanh Hai: 10, 11 Thanh Son: 29 Cao Thang: 28 Ly Tu Trong: 48	<i>Chrysalido carpuslutescens</i> H. Wendl	<i>Dasichira mendosa</i> Hubner
Thanh Thuy: 14, 21, 64–66, 86, 97, 98, 118, 119 Thanh Son: 57, 77, 78, 83 Cao Thang 7, 8 Ly Tu Trong: 76	<i>Terminalia mantaly</i> H. Perrier	<i>Thosea sinensis</i> Walker
Thanh Thuy: 49, 70 Thanh Hai: 13, 24, 53 Thanh Son: 2, 5, 7, 17, 20, 22–25, 30–32, 37–40, 47, 49, 53–56, 59, 63, 67, 68, 71, 72, 76 Cao Thang: 13, 14, 15, 17, 22, 23, 27, 29, 39, 40, 41, 45 Ly Tu Trong: 49–51, 56–59, 66, 68, 72–75, 78, 81, 85	<i>Chukrasia tabularis</i> M. Roem	<i>Plocaederus obesus</i> Gahan
Thanh Thuy: 58, 59, 88, 96, 107, 127 Thanh Hai: 42 Thanh Son: 61, 70, 75, 84 Cao Thang: 18, 20 Ly Tu Trong: 79	<i>Alstonia scholaris</i> L. R. Br.	<i>Josephiella microcarpae</i> Beardsley & Rasplus

End of Table 3

Tree location	Scientific name of the plant	Pests causing diseases in plants
Ly Tu Trong: 25–27, 29, 31–34, 97–99, 101, 103	<i>Magnolia × alba</i> (DC.) Figlar	<i>Phyllosticta yugokwa</i> Saw.
Thanh Son: 69	<i>Thevetia peruviana</i> (Pers.) K. Schum	<i>Euploea core amy-mone</i> Godart
Thanh Thuy: 143 Thanh Son: 26	<i>Mangifera indica</i> Linnaeus	<i>Planococcus citri</i> Risso

After investigating the street pest status, 12 types of pests have been identified, *Pericyma cruegeri* being the largest, accounting for 40 %. Among more than 500 trees, 90 % have been found to have pests and diseases, but the rate of pests and diseases on trees is not high.

The results of the investigation in Table 1 and the results of the disease survey have been used to determine the social status of trees according to the IUFRO classification, as presented in Table 4.

Table 4

The social status of trees according to the IUFRO classification

Species	Height	Viability	Growth Trend
<i>Magnolia × alba</i> (DC.) Figlar	Upper canopy	Class 2	Stable
<i>Bougainvillea glabra</i> Choisy	Middle canopy	Class 1	Ascending
<i>Barringtonia acutangula</i> (L.) Gaertn.		Class 2	Stable
<i>Mimusops elengi</i> L.			
<i>Artocarpus altilis</i> (Parkinson) Fosberg	Upper canopy	Class 1	Ascending
<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.		Class 2	Stable
<i>Ficus racemosa</i> L.		Class 1	Ascending
<i>Ficus bengalensis</i> L.			
<i>Peltophorum pterocarpum</i> (DC.) K. Heyne	Middle canopy	Class 2	Stable
<i>Erythrina fusca</i> Lour.			
<i>Cassia fistula</i> L.			
<i>Pterocarpus macrocarpus</i> Kurz			
<i>Tamarindus indica</i> L.	Upper canopy	Class 1	Ascending
<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.			
<i>Phanera purpurea</i> (L.) Benth.	Middle canopy	Class 2	Stable
<i>Terminalia catappa</i> L.	Upper canopy		
<i>Terminalia mantaly</i> H.Perrier	Middle canopy		
<i>Lagerstroemia speciosa</i> (L.) Pers.			
<i>Mangifera indica</i> Linnaeus	Upper canopy		
<i>Chukrasia tabularis</i> M.Roem			
<i>Khaya senegalensis</i> (Desr.) A. Juss.			
<i>Averrhoa carambola</i> L.			
<i>Alstonia scholaris</i> L. R. Br.	Upper canopy		
<i>Thevetia peruviana</i> (Pers.) K. Schum.	Lower canopy		
<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	Middle canopy	Class 2	Stable
<i>Chrysalidocarpus lutescens</i> H. Wendl		Class 1	Ascending
<i>Washingtonia filifera</i> (Lind.) H. Wendl		Class 2	Stable

Each living tree has been evaluated using the modified IUFRO classification based on tree height, viability, and growth trend. Each of the described characteristics has been assessed independently. The results show that the landscape trees in the study area are mostly middle canopy, with the ability to survive in class 2 (standard tree) and the growth trend is stable (growth is consistent). Some species that are well adapted to the urban environment are in a good state of development (class 1), especially *Bougainvillea glabra* Choisy, which is a very typical species in the landscape of the city of Da Nang (this species blooms year-round, creating diverse colorful patches in the city landscape).

However, certain trees like *Lagerstroemia speciosa* exhibit stunted growth, with leaves mostly fallen and branches broken, resulting in a loss of urban aesthetics, such as trees numbered 14, 15, 16, and 36 along Thanh Son Street. Therefore, these trees should be uprooted and replanted with trees that can withstand Da Nang's weather conditions. Many trees lean towards the road, and branches can break when the wind is strong, causing safety issues for road users. Large branches like those of trees 10, 25, 36, and 85 along the Ly Tu Trong Street need to be cut down.

Digitizing the Landscape Tree Map. According to the above steps, the tree map of the roads has been digitized as follows: Cao Thang, Thanh Hai, Thanh Son, Thanh Thuy, Ly Tu Trong (Fig. 4).

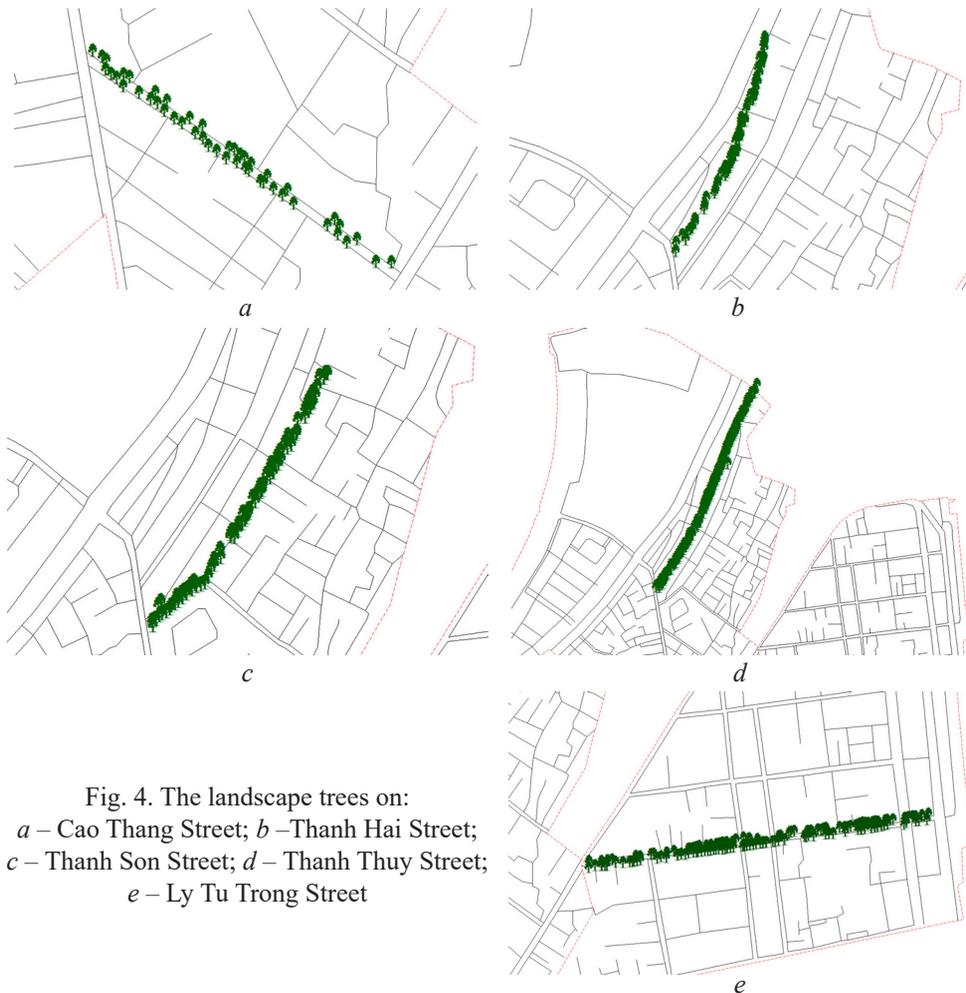


Fig. 4. The landscape trees on:
a – Cao Thang Street; b – Thanh Hai Street;
c – Thanh Son Street; d – Thanh Thuy Street;
e – Ly Tu Trong Street

After that, the digital map of landscape trees of Hai Chau District, Da Nang has been created with Mapinfo Professional 15 and Python 3.13.0 software (Fig. 5). The software can quickly support tree management. In future, during the query process, it will be possible to add, remove and change tree data directly via the software.

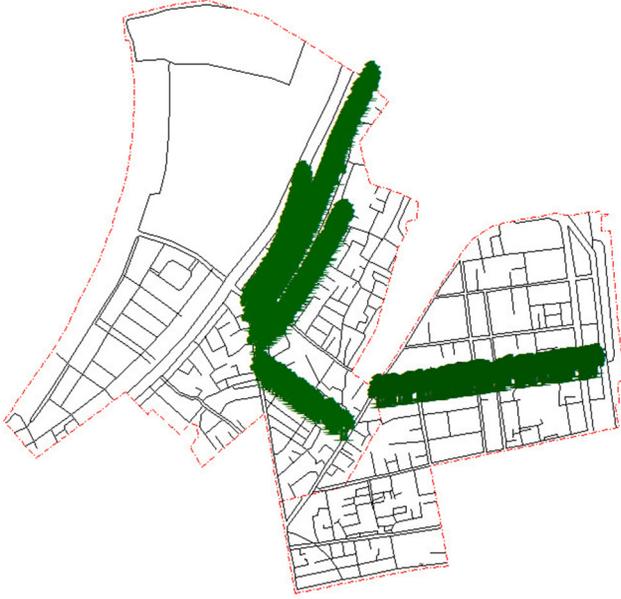


Fig. 5. The digital map of landscape trees in Hai Chau District, Da Nang

The Results of Analysis of the Relationship between Pests and Tree Location. Statistical analysis of the collected data has been conducted to examine the relationship between the presence of the disease and the location of the trees. Initially, the frequency of disease occurrence at each location has been calculated using Python 3.13.0 software. The results are presented in Table 5.

Table 5

The frequency of disease occurrence at each location

Location	Disease Occurrence Frequency
Cao Thang	0.765957
Ly Tu Trong	0.735294
Thanh Hai	0.698413
Thanh Son	0.976744
Thanh Thuy	0.836601

According to the results, Thanh Son Street is at the top with a frequency of 0.976744, and Thanh Hai Street is at the bottom with a frequency of 0.698413. Thanh Thuy, Cao Thang and Ly Tu Trong Streets are at the 2nd, 3rd and 4th places, respectively. Based on this table, correlation analysis and chi-squared test have been performed to determine statistical significance. The calculations resulted in a chi-squared value of 26.664303833569036 and a p-value of 2.3239746880920638e-05. As the results show, a p-value less than 0.05 is observed, indicating a statistically significant relationship between the tree location and the disease status. Thus, it can be concluded that the location is a factor influencing the disease status.

Another hypothesis is proposed: whether the height and diameter of the trees are related to the disease status. To investigate this hypothesis, correlation analysis and logistic regression have been performed. The results of the correlation analysis between pests and height and diameter show a correlation value between pests and diameter of 0.10309905001739862 and a correlation value between pests and height of 0.06347175723006228.

The correlation coefficient between pests and diameter of 0.1031 indicates a weak positive correlation, meaning that as the tree diameter increases, the likelihood of pest infestation also tends to increase, but this relationship is very weak and only shows a slight trend. The correlation coefficient between pests and height of 0.0635 demonstrates a very weak correlation, indicating almost no clear relationship between tree height and pest infestation. Thus, tree height does not significantly influence the occurrence of pests.

Next, a logistic regression model has been used to determine the relationship between the diameter, height, and the likelihood of tree infestation. The results are shown in Table 6.

Table 6

The relationship between the D, H and the susceptibility of plants to pests and diseases

Optimization terminated successfully. Current function value: 0.474250 Iterations 6						
Logit regression results						
Dep. variable: Pests and diseases presence				No. observations: 480		
Model: Logit				Df Residuals: 477		
Method: MLE				Df Model: 2		
Date: Mon, 16 Sep 2024				Pseudo R-squ.: 0.03532		
Time: 10:11:35				Log-Likelihood: -227.64		
Converged: True				LL-Null: -235.98		
Covariance Type: Non-robust				LLR p-value: 0.0002399		
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
const	0.0531	0.435	0.122	0.903	-0.799	0.905
D	0.0547	0.015	3.667	0.000	0.025	0.084
H	0.0268	0.057	0.472	0.637	-0.085	0.138

The model shown in Table 6 can be explained as follows:

Dependent variable: Pests and diseases presence.

Number of observations: 480.

Pseudo R-squared: 0.03532, meaning the model explains approximately 3.5 % of the variation in the data.

Log-Likelihood: -227.64, compared to LL-Null (model with no independent variables) of -235.98.

LLR p-value: 0.0002399, indicating that the model is statistically significant overall ($p < 0.05$).

The results for each variable:

Constant (const):

Coefficient: 0.0531, with a p-value = 0.903. This indicates that the constant is not statistically significant ($p > 0.05$), suggesting it may not significantly impact the prediction outcomes.

Variable D (Tree Diameter):

Coefficient: 0.0547, with a p-value = 0.000, statistically significant ($p < 0.05$), indicating that as tree diameter increases, the probability of tree pests also increases. 95 % Confidence Interval: [0.025, 0.084], indicating that the effect of D on the probability of pests is positive and significant.

Variable H (Tree Height):

Coefficient: 0.0268, p-value = 0.637, not statistically significant ($p > 0.05$), meaning that tree height does not significantly affect the probability of pest infestation in this dataset. 95 % Confidence Interval: [-0.085, 0.138], indicating that the effect of tree height is not clear.

From this, it can be concluded that the tree diameter (D) significantly influences the probability of tree infestation (as the tree diameter increases, the likelihood of pest infestation also increases). The tree height (H) does not have a clear relationship with the occurrence of pests and diseases in this dataset. In reality, Da Nang is a city prone to storms and typhoons, so landscape trees in the city are often pruned and controlled for height. This practice has influenced the analysis of the relationship between tree height and pest infestation in this study.

Methods to Improve Plant Resistance. Watering: Provide enough water for landscape plants, depending on the species and their requirements. However, avoid overwatering to prevent waterlogging and harm to the plant.

Fertilization: Use organic or chemical fertilizer to provide necessary nutrients for plants. Depending on the plant type and requirements, follow fertilizer application instructions to avoid over- or under-nutrition.

Pruning: Perform pruning to maintain the shape and size of landscape plants. Remove damaged branches, unnecessary saplings and buds to encourage growth and create a more beautiful tree shape.

Weed Control: Remove unwanted weeds and grass from the base of landscape plants. Weeds can compete with plants for water and nutrients, so keep the area around plants clean.

Pest Inspection and Treatment: Monitor landscape crops to detect early signs of pests and other problems. If an infestation is detected, appropriate treatment, such as using pesticides or natural control methods, should be taken to stop the spread and protect the tree's health.

Organize and Clean the Surrounding Area: Keep the area around landscape plants clean and tidy. Remove fallen leaves, dry twigs and other unnecessary materials to prevent the accumulation of insects and diseases.

Protect Plants from Adverse Weather: In case of adverse weather, such as heat, rain, storms, or cold, protect plants by using tarpaulins, firewood, or glass screens.

Monitor and Manage Soil Quality: Check pH, aeration and nutrient concentration to ensure good soil quality for landscape plants. Adjust soil quality by adding organic fertilizer or amendments depending on the test results.

Plant Storm-Resilient Plants: Especially for areas prone to storms like Da Nang, it is recommended to plant trees that are resilient and can withstand storms well such as *Dipterocarpus alatus* Roxb. ex G.Don, *Hopea odorata* Roxb., *Sindora siamensis* Teijsm. ex Miq., etc.

Prepare Planting Holes Thoroughly: In particular, to improve the tree's resistance, it is recommended to invest in tree planting holes and focus on changing the following:

You should replace sandy soil with loam or sandy loam to avoid uprooting plants;

Tree planting holes must comply with “National Standard TCVN 9257:2012 on Greenery Planning for Public Utilities in Urban Areas – Design Standards. Construction Publishing House. 2021”. The size of the tree planting space is specified as follows: row trees on the sidewalk; square-shaped open holes: minimum 1.2×1.2 m; circle with a minimum diameter of 1.2 m. This ensures space for the tree’s roots to grow. Meanwhile, most tree planting holes in the investigation area do not meet standards, so trees often tilt and fall.

When planting trees, the pit’s depth should be greater than the root ball’s height. If the tree has a root ball, it should be removed before planting, and fertilizers should be added below it to facilitate root growth. The tree’s root base should be placed lower than the ground surface to enhance wind resistance.

Due to the hot and sunny weather in Da Nang, urban tree planting tends to prioritize immediate shade by planting tall and mature trees. However, this practice can have drawbacks. When transplanting tall trees, the roots must be pruned, which alters the root system and prevents deep root penetration. Therefore, it is recommended that young trees be planted to avoid disturbing the taproot and facilitate deep root development, preventing uprooting during storms. When the tree is young, you must carefully support it so it grows straight and does not tilt. Monitor and promptly remove any trees that show signs of leaning and replace them with new ones.

Conclusion

After investigating Cao Thang, Thanh Hai, Thanh Thuy, Thanh Son, and Ly Tu Trong Streets, over 500 trees have been selected for the study organized into a list of 27 tree species. Among them, the most common trees are *Peltophorum pterocarpum*, *Terminalia catappa*, *Barringtonia acutangula*, and *Chukrasia tabularis*; the least common trees are *Averrhoa carambola*, *Mangifera indica*, *Artocarpus heterophyllus*, *Chrysalidocarpus lutescens*, and *Thevetia peruviana*. A pest investigation of the trees has been conducted. Most landscape trees in the study area have common pests and diseases, for example, *Peltophorum pterocarpum* are infested with *Pericyma cruegeri*. All the data on the current status of landscape plants have been built on GIS maps through Mapinfo 15 software, supporting managers in understanding the current status of each plant and updating changes in the following years. The statistical analysis results indicate that the position and diameter of the tree have an impact on the presence of pests and diseases, while the effect of tree height is not clear.

The findings on the soil and light conditions in the study area show that such trees as *Peltophorum pterocarpum*, *Terminalia catappa*, *Terminalia mantaly*, *Chukrasia tabularis*, *Alstonia scholaris*, *Mimusops elengi*, etc., are thriving and adapting well. However, some trees demonstrate stunted growth, leaf shedding, branch breakage, and aesthetic issues in urban areas. Trees leaning towards the road pose a safety hazard to traffic participants, especially during strong winds. Therefore, these trees need to be removed and replaced with more climate-adaptive species suitable for the climate of Da Nang. To improve tree resilience, attention should be given to tree hygiene, tree care, proper tree planting, and planting trees when they are young.

REFERENCES

1. An N.T.T. *Applying Remote Sensing and GIS to Research and Evaluate the Current Status of Urban Greenery in Cau Giay District*: Master's Thesis. Hanoi, 2016. 84 p.
2. Ban N.T. *A Handbook for Searching and Recognizing Families of Angiosperms in Vietnam*. Ha Noi Agriculture Publ. House, 1997. 532 p. (In Viet.).
3. Bepalov A.A. *Landscape Zoning of the Sea of Azov Using Elements of GIS Technologies*: Cand. Geogr. Sci. Diss. Rostov-on-Don, 2005. 152 p. (In Russ.).
4. Chapalda T.L., Chulkova V.V., Saparlycheva S.E. Effectiveness of Poisonous Plants in the Fight with Pests and Diseases of Field and Garden Crops. *Vestnik biotekhnologii* = Bulletin of Biotechnology, 2020, no. 2(23), pp. 11–17. (In Russ.).
5. Connelly L. Chi-Square Test. *Medsurg Nursing*, 2019, vol. 28, iss. 2, p. 127.
6. Cuong L.H. *Textbook on Plant Diseases*. Hue University Publ. House, 2018. 200 p. (In Viet.).
7. Dai N.H. *Plants of Vietnam*. Ha Noi Science and Technics Publ. House, 2007, vol. 11. 262 p. (In Viet.).
8. Dong D.V., Dinh D.T. *Preventing Pests and Diseases on Some Popular Flower Species*. Ha Noi, Agriculture Publ. House, 2003. 109 p. (In Viet.).
9. Ezhov O.N. Pests and Diseases of Municipal Green Plantations of Arkhangelsk Industrial Centre. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2008, no. 3, pp. 46–51. (In Russ.).
10. Ha D.V. Current Status and Development Solutions Shade Trees for Street System in Thanh Hoa City. *Journal of Forestry Science and Technology*, 2016, no. 1, pp. 3–13. (In Viet.).
11. Hop T. *Ornamental Plants and Flowers of Vietnam*. Ha Noi Agriculture Publ. House, 2000. 535 p. (In Viet.).
12. Huong D.T.V. *Managing the Green Tree System in the Citadel-Hue Area using GIS Technology*. Hue University of Sciences, 2006. 26 p. (In Viet.).
13. Jan J. Correlation Analysis. *Digital Signal Filtering, Analysis and Restoration*, 2020, pp. 171–197. https://doi.org/10.1049/pbte044e_ch8
14. Kopsishev E.E., Baygarin D.D., Imanbaeva M.T., Soltangulova A.N. Application of GIS technologies in Monitoring and Assessing the Condition of Agricultural Land in the Kazakh Sector of the Caspian Sea. *Organic Agriculture in the Republic Of Kazakhstan: Present And Future*: Materials of the International Scientific-Practical Conference. Astana, 2016, pp. 151–155. (In Russ.).
15. Kovyazin V.F., Do Q.H., Tran H.H., Do H.H. Determination of Forest Land Categories in the Kim Hy Nature Reserve of the Socialist Republic of Vietnam with the GIS Technologies Application. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 6, pp. 39–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.39>
16. Kovyazin V.F., Do H.H. Silvicultural and Dendrological Characteristics of Trees and Shrubs in Reserve “Yuntolovsky”. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2017, no. 218, pp. 6–19. (In Russ.).
17. Ly C.D. *Building an Information System for Managing Street Trees and Parks in Ho Chi Minh City*: Project of Ho Chi Minh City Institute of Environment and Natural Resources and Ho Chi Minh City CVCX Company, 2008. 300 p. (In Viet.).
18. Mao T.V. *Forest Tree Diseases*. Ha Noi Agriculture Publ. House, 1997. 151 p. (In Viet.).
19. Mao T.V., Nha N.T. *Preventing Pests and Diseases of Ornamental Plants*. Hanoi Agricultural Publ. House, 2001. 152 p. (In Viet.).
20. Mendonça de A.R., Calegario N., Silva da G.F., Coimbra Borges L.A., Chaves e Carvalho S.P. Height Diameter Relationship and Growth in Height the Dominant and Co-dominant Trees Model to *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Scientia Forestalis*, 2011, vol. 39, no. 90, pp. 151–160. (In Port.).

21. Ministry of Agriculture and Rural Development Vietnam. *Name of Vietnamese Forest Trees*. Ha Noi Agriculture Publ. House, 2000. 460 p. (In Viet.).
22. Nha N.T. Composition and Basic Biological Characteristics of Ornamental Plant Pests of the Genus *Ficus* in Xuan Mai Area. *Journal of Forestry Science and Technology*, 2012, no. 1, pp. 48–57. (In Viet.).
23. Nick T.G., Campbell K.M. Logistic Regression. *Methods in Molecular Biology*, 2007, no. 404, pp. 273–301. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-530-5_14
24. Pietsch M. GIS in Landscape Planning. *Landscape Planning*, 2012, pp. 55–84. <https://doi.org/10.5772/38996>
25. Quynh D.T.D. *Applying GIS to Manage Shade Trees on Some Streets in Hai Chau District, Da Nang City*: Master's Thesis, 2013. 24 p. (In Viet.).
26. Reddy M.S. Chi-square Test and Its Utility in Forest Ecology Studies. *Journal of Global Ecology and Environment*, 2023, vol. 17, iss. 1, pp. 1–5. <https://doi.org/10.56557/jogee/2023/v17i18020>
27. Santos M.J., Whitham T.G. Predictors of *Ips confusus* Outbreaks During a Record Drought in Southwestern USA: Implications for Monitoring and Management. *Environmental Management*, 2010, vol. 45, pp. 239–249. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9413-6>
28. Silva L.B., Da Silva Oliveira A., Carneiro E., Ferreira Rodrigues R.H., Gomes De Sousa M. de N., Medeiros J.C., Pavan B.E., Farias e Silva M.C., and Rodrigues De Brito R. Path Analysis between Pest Occurrence and Nutritional Status of Soybean under Phosphate Fertilization. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2020, vol. 23, iss. 11, pp. 1408–1415. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.1408.1415>
29. Sudhakar R.C. Applications of GIS in Plant Taxonomy, Species Distribution and Ecology. *Journal of Economic and Taxonomic Botany*, 2018, vol. 41, pp. 95–106.
30. Tubby K., Webber J.F. Pests and Diseases Threatening Urban Trees Under a Changing Climate. *Forestry*, 2010, vol. 83, iss. 4, pp. 451–459. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq027>
31. Vail K.M., William E. *Insects: An Introduction to Integrated Pest Management of Landscapes*. The University of Tennessee Agricultural Extension Service, 1999. 8 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*182.22:582.475.2(282.247.11)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-26-41

Структура и состояние древесного яруса коренных ельников притундровой зоны в бассейне Печоры

А.В. Манов[✉], канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

И.Н. Кутявин, д-р биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, ГСП-2, г. Сыктывкар, Россия, 167982; manov@ib.komisc.ru[✉], kutjavin-ivan@rambler.ru

Поступила в редакцию 23.03.24 / Одобрена после рецензирования 19.06.24 / Принята к печати 20.06.24

Аннотация. Исследованы динамические процессы в коренных еловых фитоценозах в сложных климатических условиях притундровой зоны, смягчаемых теплом, приносимым с юга водами р. Печоры. Сбор полевого материала проводился на постоянных пробных площадях в течение 3 периодов (2005–2006, 2013, 2022 гг.) в ельниках разных типов. Анализировалась динамика размерной структуры и жизненного состояния древесных растений коренных ельников на основе изменчивости диаметров стволов деревьев на высоте 1,3 м и высоты подроста. Полученные данные показывают, что с увеличением среднего диаметра деревьев ели в древостоях притундровых ельников разных типов возрастает коэффициент вариации. Распределение деревьев по абсолютным ступеням толщины характеризуется небольшой растянутостью, обычно с 1 максимумом, смещенным влево. В ельниках, развивающихся на болотно-подзолистых почвах, большинство деревьев относится к мелким ступеням толщины (≤ 10 см). В ельниках зеленомошной группы типов интервал ступеней толщины растянут из-за наличия в древостоях крупных деревьев. Такая размерная структура свойственна для коренных ельников средней тайги. Распределение общего древесного запаса по ступеням толщины описывается пульсирующей кривой с одним максимумом, которая в некоторых случаях может прерываться на больших ступнях. Размеры подроста оказались более изменчивыми во времени. Под пологом древостоев притундровых еловых лесов наблюдается непрерывный возобновительный процесс. Стационарное наблюдение за жизнеспособностью и поврежденностью деревьев и подроста, основанное на визуальной оценке растения по кроне, показало улучшение как верхних ярусов древесного полога, так и нижних – подроста. Древостой и подрост, характеризовавшиеся в начале наблюдения как ослабленные, за период мониторинга перешли в категорию здоровых. Результаты исследования являются частью экологического мониторинга саморегулирующихся еловых лесов в бассейне р. Печоры. Долгосрочные научные работы на постоянных пробных площадях позволяют изучить изменчивость растительных сообществ и их реакцию на глобальные изменения климата, что способствует более глубокому пониманию механизмов, лежащих в основе этих изменений, а также способов адаптации к ним. Полученные данные послужат основой для дальнейшего экологического мониторинга и прогнозирования состояния саморегулирующихся печорских лесов.

Ключевые слова: притундровая зона, динамика, размерная структура, коренные ельники, жизненное состояние, древостой, подрост

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Института биологии Коми НЦ УрО РАН № 125020501547-8. Авторы глубоко признательны д-ру биол. наук Капитолине Степановне Бобковой, под чьим руководством заложены объекты и начаты исследования на них, а также сотрудникам отдела лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН, принимавшим участие в сборе полевых материалов.

Для цитирования: Манов А.В., Кутявин И.Н. Структура и состояние древесного яруса коренных ельников притундровой зоны в бассейне Печоры // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 26–41. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-26-41>

Original article

The Structure and Condition of the Tree Layer of Indigenous Spruce Forests of the Subtundra Zone in the Pechora River Basin

Aleksey V. Manov[✉], Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: [P-9089-2015](https://orcid.org/0000-0002-5070-0078), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-0078>

Ivan N. Kutjavin, Doctor of Biology, Senior Research Scientist; ResearcherID: [P-9829-2015](https://orcid.org/0000-0002-7840-1934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7840-1934>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, GSP-2, Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russian Federation; manov@ib.komisc.ru[✉], kutjavin-ivan@rambler.ru

Received on March 23, 2024 / Approved after reviewing on June 19, 2024 / Accepted on June 20, 2024

Abstract. Dynamic processes in indigenous spruce phytocenoses have been studied in the challenging climatic conditions of the subtundra zone, moderated by the heat brought from the south by the waters of the large Pechora River. Field material has been collected on permanent sample plots during 3 periods (2005–2006, 2013, 2022) in spruce forests of different types. The dynamics of the size structure and vitality status of woody plants in indigenous spruce forests have been analyzed based on the variability of tree stem diameters at a height of 1.3 m and the height of undergrowth. The data obtained show that with an increase in the average diameter of spruce trees in stands of subtundra spruce forests of different types, the coefficient of variation increases. The distribution of trees by absolute diameter classes is characterized by a slight stretch, usually with 1 maximum shifted to the left. In spruce forests developing on swampy-podzolic soils, most of the trees belong to small diameter classes (≤ 10 cm). In spruce forests of the green-moss type group, the interval of diameter classes is extended due to the presence of large trees in the stands. This dimensional structure is typical for the indigenous spruce forests of the middle taiga. The distribution of the total stand of timber by diameter classes is described as a pulsating curve with a single maximum, which, in some cases, may be interrupted at larger diameter classes. The size of the undergrowth has turned out to be more variable over time. Under the canopy of stands of subtundra spruce forests, a continuous renewal process is being observed. Stationary monitoring of the viability and damage of trees and undergrowth, based on a visual assessment of the plant by the crown, has shown an improvement in both the upper layers of the tree canopy and the lower layers of the undergrowth. The stand and undergrowth, which have been characterized as weakened at the beginning of the observation, moved into the healthy category during the monitoring period. The results of the research are part of the environ-

mental monitoring of self-regulating spruce forests in the Pechora River basin. Long-term scientific work on permanent sample plots allows us to study the variability of plant communities and their response to global change, which contributes to a deeper understanding of the mechanisms underlying these changes, as well as ways of adapting to them. The data obtained will serve as a basis for further environmental monitoring and forecasting of the state of self-regulating Pechora forests.

Keywords: subtundra zone, dynamics, size structure, indigenous spruce forests, vitality status, stand, undergrowth

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment for the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences no. 125020501547-8. The authors are deeply grateful to Kapitolina Stepanovna Bobkova, Doctor of Biology, under whose guidance the objects were laid and research was started on them, as well as to the staff of the Department of Forest Biological Problems of the North of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, who participated in the collection of field materials.

For citation: Manov A.V., Kutyavin I.N. The Structure and Condition of the Tree Layer of Indigenous Spruce Forests of the Subtundra Zone in the Pechora River Basin. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 26–41. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-26-41>

Введение

Притундровая зона – циркумполярный пояс на севере Евразии и Америки, сформированный лесными, горно-тундровыми и болотными ландшафтами, где доминирующее положение принадлежит экосистемам с лесной растительностью [19]. Около 1/3 бореальных лесов России расположены в этой зоне. Здесь находятся основные площади бассейнов рек, которые несут свои воды с юга в северные моря, продолжительное время подпитывая теплом прибрежные районы и таким образом влияя на региональный климат [27].

Особый интерес вызывает притундровая защитная полоса, которая в бассейне р. Печоры простирается на ширину 90–250 км. Она образует отдельный эволюционно сформировавшийся биом в зоне контакта тайги и тундры. Лесопокрытая площадь территории, согласно учету лесного фонда на 1 января 2021 г., составляет 6 072,9 тыс. га, из которых 82 % занимают спелые и перестойные леса. На сегодняшний день значительная часть этих лесов остается почти нетронутой. Они являются средой обитания для диких животных, представляют социальную и экологическую ценность для региона, поддерживают биоразнообразие. С учетом важности притундровых лесов законом правительства в 1959 г. в ее пределах была образована защитная полоса притундровых лесов. Однако в притундровой и тундровой зонах в бассейне р. Печоры интенсивно осваиваются нефтяные запасы и, как следствие, резко увеличивается антропогенная нагрузка на хрупкие экосистемы. Следовательно, в ближайшем будущем изучение девственных лесов при росте угрозы устойчивости обеспечения экосистемных услуг может стать еще более востребованным [33].

Лесные биогеоценозы как системы открытого типа взаимосвязаны друг с другом и окружающей средой через разнообразные потоки вещества и энергии [24]. Изучение изменений в лесных сообществах и их компонентах под воздействием изменений климата особенно актуально в районах с экстремальными

почвенно-климатическими условиями, к которым относится и притундровая зона Печорского бассейна [22, 23, 32]. Так, средняя температура воздуха, по данным ближайшей к объектам исследования метеостанции Усть-Цильма, за период современного потепления (с 1981 г. по настоящее время) превышает климатическую норму на 1,1 °С. Несмотря на вариативность уровня осадков в пространстве, считается, что в арктических регионах их количество увеличивается каждое десятилетие на 0,5–1,0 %.

Леса притундровой зоны Печорского бассейна характеризуются небольшим разнообразием видов деревьев. Основная порода здесь – ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), и фитоценозы, формируемые при ее преобладании, занимают 74 % покрытой лесом территории. Благодаря своей адаптивности к различным экологическим условиям ель может произрастать как на песчаных, так и на глинистых почвах, образуя обширные массивы монодоминантных лесов и редколесья в северных широтах европейского Северо-Востока [9].

В 2004–2005 г. мы отмечали ослабленное состояние притундровых ельников Печорского бассейна [29]. Очевидно, что длительная тенденция потепления климата, характерная для всей России и северного полушария на протяжении последних 40 лет [3], должна оказать положительное воздействие на состояние древесного полога ельников в приполярных фитоценозах, где тепло является определяющим фактором для роста и развития растений.

Цель исследования заключается в изучении многолетней динамики размерной структуры древостоя и подроста, а также их жизненного состояния в коренных ельниках притундровой зоны в бассейне р. Печоры.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования представлены ненарушенными коренными ельниками зеленомошной, долгомошной и сфагновой групп типов, занимают плоские пространства в рельефе местности Печорской низменности (65°54'–65°55' с. ш. 52°28'–52°39' в. д.). Они низкобонитетные (V–Vб классов), отличаются сложной структурой и являются смешанными по составу. В качестве сопутствующих пород встречаются лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.) всегда находится в примеси с елью. Под пологом древостоев развивается подрост разных высоты и состояния, сформированный теми же видами, что и древостой. Нижний ярус – это редкий подлесок, включая можжевельник, шиповник, рябину кустовой формы, ольху, ивы и березу карликовую. Травяно-кустарничковый ярус характеризуется преобладанием черники, брусники, морошки и голубики. В ельниках развит моховой покров, где доминируют *Sphagnum* sp., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt. и *Polytrichum commune* Hedw. Растительные сообщества располагаются на подзолистых и болотно-подзолистых почвах.

Исследуемый район характеризуется суровым климатом, длительной морозной зимой и коротким прохладным летом. Присутствие многоводной реки, обширных болот и обилие осадков при слабом испарении создают избыточную влажность. Световой период с июня по июль круглосуточный, что приводит к увеличению суммы физиологически активной радиации и снижению перепадов температур в течение суток.

Для сбора данных в полевых условиях использовались стандарт ОСТ 59-69–83 и руководство [26]. В 2005 и 2006 гг. на территории были заложены постоянные пробные площади (ППП) прямоугольной формы по 0,12 га в разных типах еловых сообществ. Размеры ППП обеспечивают необходимое число наблюдений в древостоях для вычисления статистических показателей вариационного ряда с точностью 5 % при уровне значимости 0,05 [5]. В притундровых лесах могут закладываться ППП и меньшего размера при соблюдении минимальных объемов полевых исследований, рассчитанных при помощи математической статистики [16]. В течение 3 периодов: 2005–2006, 2013, 2022 г. – проводился учет всех деревьев в зависимости от их породы, диаметра, высоты и состояния. Возраст деревьев определялся путем подсчета годичных слоев на кернах, взятых с 20–30 % растений всех пород на каждой ППП. Подрост учитывали на ППП по породе, высоте и состоянию. Деревья с диаметром ствола ≥ 6 см на высоте 1,3 м относились к древостою, а другие древесные растения высотой $\geq 0,25$ м и потенциально способные образовать древостой считались подростом.

Исследование изменений в размерной структуре древостоев и подроста ельников основано на анализе изменчивости диаметров стволов деревьев и высоты подроста. Для оценки неравенства распределения древесных растений по размерам использовался коэффициент Джини (CG), предложенный для этих целей С. Damgaard и J. Weinter [30]. Коэффициент Джини может колебаться от 0 до 1. Чем выше отклонение от 0, тем более сосредоточены деревья в определенной размерной категории. CG = 0 указывает на идеальное равномерное распределение (одинаковое количество деревьев в каждой размерной категории).

Анализ экологической структуры древостоев и подроста в притундровых ельниках проводился с применением методики, базирующейся на визуальной оценке состояния дерева на основе характеристик их кроны и соответствующих коэффициентов жизнестойкости [1]. Этот метод был разработан автором для мониторинга состояния древостоев как в поврежденных, так и в фоновых насаждениях, где структура древесной растительности во многом определяется процессами конкуренции за жизненное пространство и питательные вещества. Он широко используется в качестве показателя состояния лесов при мониторинге лесных земель [13].

Оценивая состояние древостоев и подроста, предлагается присваивать древесному растению коэффициент, отражающий его жизненный и продукционный потенциал, определяемый прежде всего объемом способных к нормальному функционированию ассимиляционных органов. На основе эмпирических данных разными авторами названы условные коэффициенты жизнестойкости каждой категории состояния деревьев и подроста (табл. 1, 2). В большинстве случаев они показывают схожие результаты оценки жизненного состояния растительного сообщества. Коэффициенты, перечисленные в работе [15], отличаются завышенными (на 10 %) характеристиками здоровья лесных сообществ.

Расчеты индексов жизненного состояния древостоев выполнялись нами на основе числа деревьев и объема стволовой древесины. Относительное жизненное состояние древостоя (%) вычислялось по формуле:

$$L_n = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N,$$

где n_1, n_2, n_3, n_4 – количество здоровых, ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев соответственно, дер./га; N – общее количество деревьев, за исключением старого сухостоя, дер./га.

Таблица 1

Коэффициенты жизненности деревьев по категориям состояния, %
Tree vitality coefficients by condition categories, %

Здоровый	Ослабленный	Сильно ослабленный	Отмирающий	Литературный источник
100	70	40	5	В.А. Алексеев [1]; «Лесные...» [10]
100	70	40	10	С.М. Бебия [2]; «Методы...» [14]; А.С. Евдокимов, В.Т. Ярмишко [4]
100	80	40	20	Е.Г. Мозолевская, Т.В. Шарапа [15]
100	66	43	13	П.Н. Катютин, В.В. Горшков [6]

Таблица 2

Коэффициенты жизненности подроста по категориям состояния, %
Undergrowth vitality coefficients by condition categories, %

Здоровый	Сомнительный	Усыхающий	Литературный источник
100	70	10	П.А. Цветков, Д.А. Киришева [25], К.С. Bobkova, A.V. Manov [29]
100	70	30	Е.А. Робакидзе, Н.В. Торлопова [18]

Коэффициент здорового дерева приравнивается к 100 %, а сухостоя – к 0 %. Для деревьев с промежуточными состояниями указываются соответствующие им коэффициенты. При расчетах учитывался только свежий сухостой, т. к. в 1-е годы после гибели он еще оказывает влияние на древостой.

При $L_n = 100-80$ % древостой считается здоровым; при 79–50 % – ослабленным; при 49–20 % – сильно ослабленным; при ≤ 19 % – полностью разрушенным.

Помимо оценки жизненного состояния древостоя важно также знать уровень его поврежденности (%) [1]:

$$D_n = (30n_2 + 60n_3 + 95n_4 + 100n_5) / N,$$

где n_2, n_3, n_4, n_5 – количество поврежденных (ослабленных), сильно поврежденных (сильно ослабленных), усыхающих (отмирающих) деревьев и сухостоя (включая старый сухостой) соответственно, дер./га.

$D_n = 11-19$ % указывает на начальную стадию ослабления древостоя; 20–49 % – древостой поврежденный; 50–79 % – сильно поврежденный; ≤ 80 % – разрушенный.

Анализ жизненного состояния и поврежденности древостоев по объему стволовой древесины (L_n) осуществлялся с применением тех же формул и коэффициентов, что и для числа деревьев.

Жизненное состояние подроста (%) оценивалось по его численности с использованием модифицированной формулы для древостоев:

$$L_n = (100n_1 + 70n_2 + 10n_3) / N,$$

где n_1, n_2, n_3 – количество здоровых, сомнительных и усыхающих экземпляров подроста соответственно, экз./га; N – общее количество подроста, включая сухостой, экз./га.

Термин «жизненное состояние» или «жизненность» (деревьев, древостоя) трактуется нами как параметр морфометрических характеристик роста и развития деревьев в момент наблюдения за ними.

Результаты исследования и их обсуждение

В период полевых работ (2005–2022 гг.) следов антропогенного или природного воздействия на изучаемые лесные сообщества не обнаружено. Однако за этот относительно короткий срок наблюдались изменения в доминантах напочвенного покрова в пределах 1 группы типов леса в 2 ельниках. Так, ельник чернично-сфагновый (ППП 8) стал морошково-сфагновым, а ельник зеленомошно-лишайниковый (ППП 10) – зеленомошным. Во всех рассматриваемых фитоценозах отмечаются небольшие сдвиги (до 2 ед.) в участии различных пород древесных растений в составе древостоев и подроста. Коэффициент вариации (CV) свидетельствует о небольшой изменчивости таксационных показателей (густота, полнота и запас) древостоев от 1 до 22 % (табл. 3). Наименьшие трансформации зафиксированы в самом продуктивном из изученных сообществ – ельнике разнотравно-зеленомошном (ППП 6), в то время как наибольшие – в ельнике морошково-сфагновом (ППП 8). Густота подроста проявляет более высокую лабильность (CV = 14–42 %) по сравнению с показателем древостоев (CV = 1–11 %).

Таблица 3

**Временные изменения таксационных показателей древостоя
и подроста в ельниках**
**The temporal changes in the inventory indicators of stands
and undergrowth in spruce forests**

Год учета	Древостой					Подрост		
	состав	амплитуда возраста (средний возраст ели), лет	густота, шт./га	сумма площадей сечения, м ² /га	запас стволовой древесины, м ³ /га	состав	густота, шт./га	средняя высота, м
<i>Разнотравно-зеленомошный (ППП 6)</i>								
2005	7ЕЗБ	100–234 (166)	1433	41,2	335	9Е1Б	507	1,5
2013	6Е4Б	Не определено	1367	42,5	348	10Е	325	2,1
2022	7ЕЗБ	95–252 (167)	1450	40,1	320	10Е	217	2,0
		m	1417	41,3	334		350	1,9
		σ	±44	±1,2	±14		±147	±0,3
		CV	3	2	4		42	16
<i>Сфагновый (ППП 7)</i>								
2005	9Е1С+Б	30–310 (180)	747	5,2	19	8Е2С ед.Б	3017	1,5
2013	8Е2С+Б	Не определено	850	8,3	26	8Е2С ед.Б	2581	1,7
2022	7Е3С ед.Б	32–277 (186)	783	5,8	22	6Е4С ед.Б	3317	2,0
		m	855	6,8	24		3114	1,8
		σ	±75	±1,3	±2		±445	±0,4
		CV	9	14	8		14	21
<i>Морошково-сфагновый (ППП 8)</i>								
2005	8Е2Б	80–270 (168)	1267	16,1	85	6Е4Б+С	719	2,0

Окончание табл. 3

Год учета	Древостой					Подрост		
	состав	амплитуда возраста (средний возраст ели), лет	густота, шт./га	сумма площадей сечения, м ² /га	запас стволовой древесины, м ³ /га	состав	густота, шт./га	средняя высота, м
2013	8Е2Б	Не определено	1025	11,4	58	6Б4Е ед.С	1193	2,4
2022	7Е3Б	78–278 (175)	1108	13,2	67	5Е5Б ед.С	900	2,7
		m	1133	13,6	70	931		2,4
		σ	±123	±2,4	±14	±230		±0,4
		CV	11	14	20	25		16
<i>Зеленомошный (ППП 10)</i>								
2006	5Е4Л- ц1Б	50–305 (118)	950	18,4	127	7Б3Е ед.С	1686	1,3
2022	5Е5Лц ед.Б	48–322 (115)	933	22,4	174	7Б3Е+С	1100	2,8
		m	942	20,4	151	1393		2,1
		σ	±12	±2,8	±33	±414		±1,0
		CV	1	15	22	30		49
<i>Кустарничково-долгомoшный (ППП 12)</i>								
2006	7Е3Б	110–212 (174)	1083	12,5	65	6Б4Е	1319	2,2
2022	9Е1Б	59–229 (177)	1250	14,6	81	5Е5Б	1672	2,1
		m	1167	13,6	73	1496		2,1
		σ	±118	±1,5	±11	±250		±0,1
		CV	10	7	15	17		3

Примечание: Е – ель сибирская; С – сосна обыкновенная; Лц – лиственница сибирская; Б – береза извилистая. Единица коэффициента состава равна 10 % общего запаса данной породы в древостое. Доля участия породы: «+» – 2–5 %; «ед.» – < 2 %. Статистические показатели: m – среднее значение; σ – стандартное отклонение.

Размеры стволов деревьев представляют собой один из наиболее изменчивых показателей структурной организации древесного полога, даже в одновозрастных сообществах. Поэтому оценку динамики морфоструктуры древостоев рекомендуется проводить по диаметру ствола, его высоте или производным от них характеристикам полноты и запаса древостоя [20]. Для коренных ельников притундровой зоны исследование неравенства в распределении древесных растений по размерам позволило проанализировать результаты долгосрочного мониторинга структуры древостоев и подроста. Полученные данные показывают, что с увеличением среднего диаметра деревьев ели в древостоях притундровых ельников разных типов возрастает коэффициент вариации. Так, в начале наблюдений (2005–2006 гг.) на ППП он составлял 21–37 %, а в 2022 г. увеличился до 30–42 %. Распределению деревьев по абсолютным ступеням толщины свойственна небольшая растянутость, обычно с 1 максимумом, смещенным влево (рис. 1). В ельниках, развивающихся на болотно-подзолистых почвах, большинство деревьев сконцентрировано в мелких ступенях толщины (≤ 10 см). В ельниках зеленомошной группы типов интервал ступеней толщины растянут из-за наличия в древостоях крупных

деревьев ели и березы на ППП 6, а также лиственницы на ППП 10. В ельнике сфагновом для начальных ступеней толщины наблюдается увеличение числа деревьев сосны. Снижение количества ели отмечено для сфагновой группы типов. Лиственница встречается в составе древостоев только в ельнике зеленомошном, где она представлена крупными экземплярами. Распределение общего древесного запаса по ступеням толщины характеризуется пульсирующей кривой с 1 максимумом, которая в некоторых случаях может прерываться на больших ступнях.

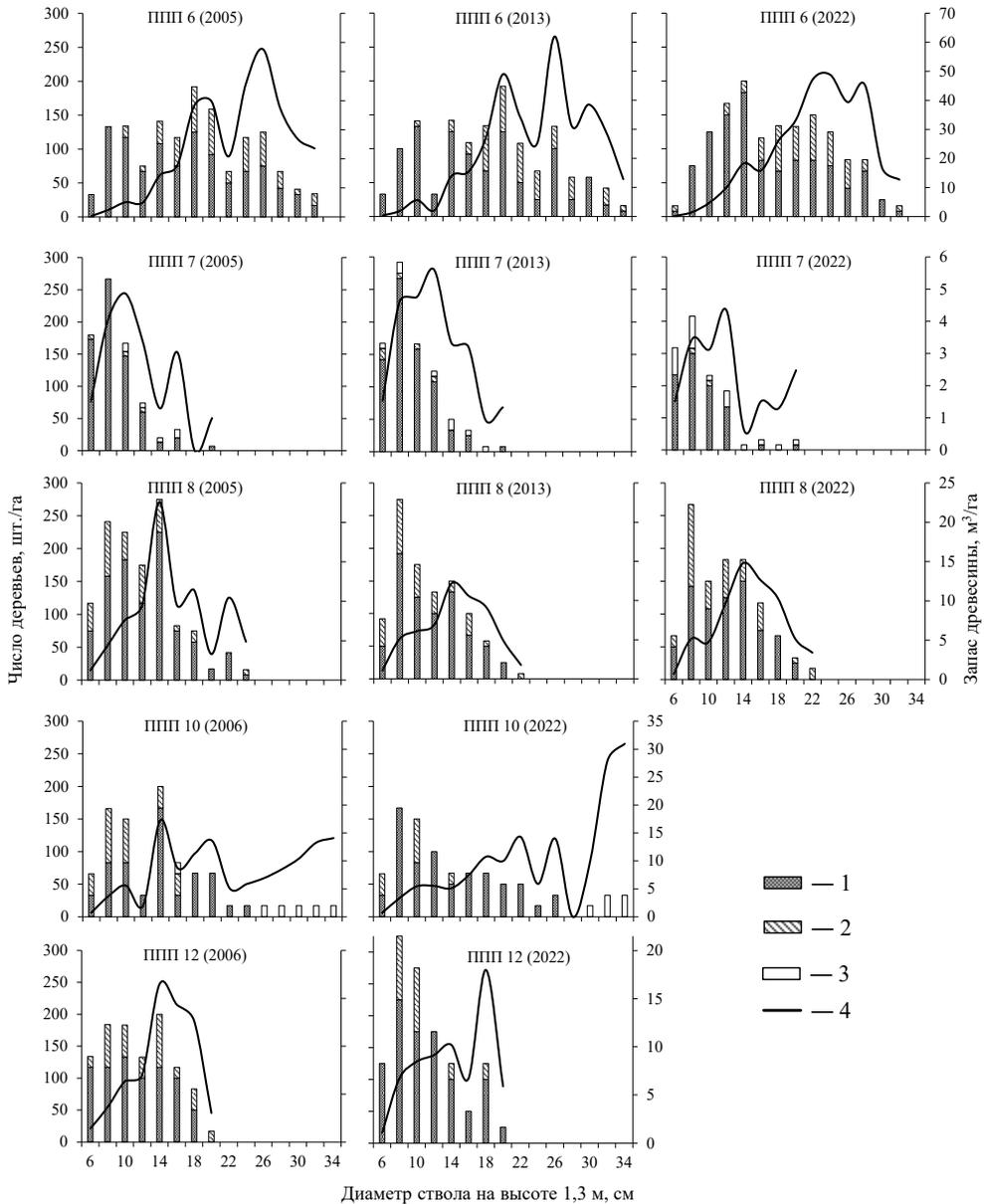


Рис. 1. Динамика численности деревьев ели (1), березы (2) и светлехвойных пород (3), а также общего запаса древесины (4) по ступеням толщины

Fig. 1. The dynamics of the number of spruce (1), birch (2) and light coniferous (3) trees, as well as the total stand of timber (4) by diameter classes

Под пологом древостоев притундровых ельников всегда можно обнаружить подрост разных состояния и размеров. В рассматриваемых ельниках преобладает подрост средней (0,6–1,5 м) и крупной (> 1,5 м) категорий (рис. 2). Наибольшая численность подроста наблюдается в ельнике сфагновом, а наименьшая – в ельнике разнотравно-зеленомошном. В сфагновом сообществе увеличивается количество подроста сосны для каждой категории крупности. Также отмечается появление мелкого ($\leq 0,5$ м) и среднего 0,6–1,5 м подроста сосны в ельнике морошково-сфагновом. В районе работ во всех изученных и сопредельных сообществах, включая лиственничные, отсутствует подрост лиственницы.

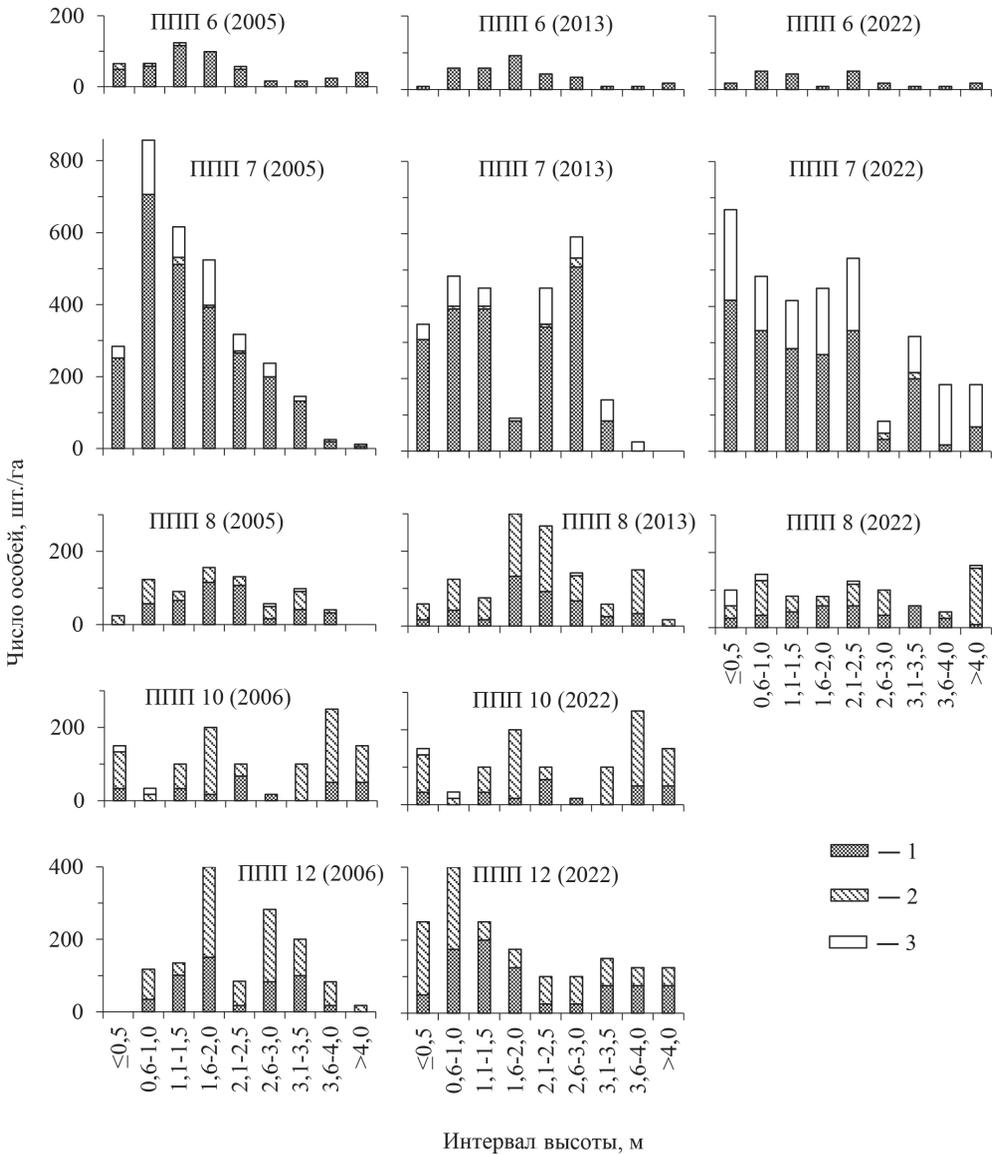


Рис. 2. Динамика численности подроста ели (1), березы (2) и сосны (3) по интервалам высоты

Fig. 2. The dynamics of the number of spruce (1), birch (2) and pine (3) undergrowth by height intervals

Расчеты коэффициента Джини показали, что неравенство распределения деревьев по диаметру ствола в исследуемых ельниках за период наблюдений существенно не изменилось (рис. 3, *а*). Отмечается относительно низкий уровень неравенства во всех рассматриваемых типах леса как в начале наблюдений ($CG = 0,19–0,24$, в среднем $0,20$), так и в конце ($CG = 0,17–0,29$, в среднем $0,21$).

В отличие от распределения деревьев распределение подроста по ступеням высоты оказывается более изменчивым во времени, что, на наш взгляд, связано с неоднородностью урожаев семян на Севере (рис. 3, *б*). Разница распределения подроста по размерному ряду на 30 % выше, чем у деревьев. За период наблюдений CG по типам леса изменился с $0,22–0,35$ (в среднем $0,29$) до $0,31–0,37$ (в среднем $0,34$). Наиболее низкие коэффициенты были зафиксированы в середине наблюдений ($CG = 0,23–0,26$, в среднем $0,24$).

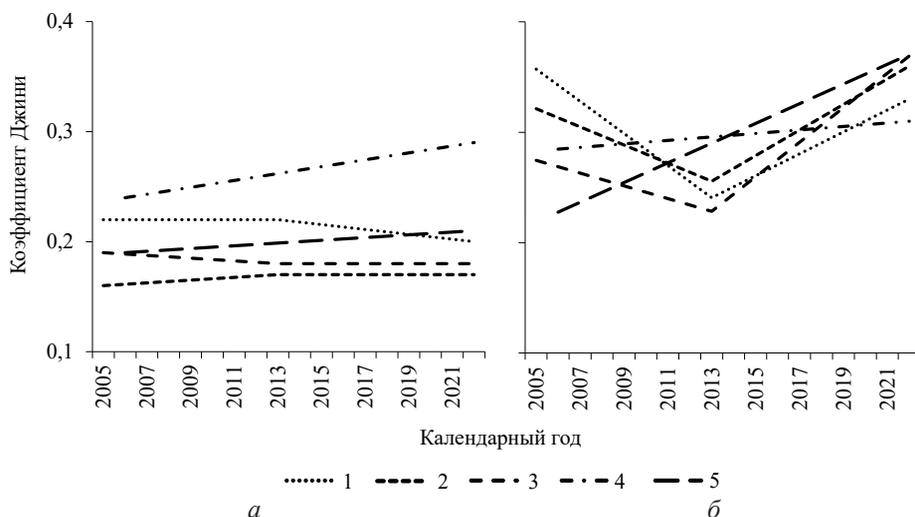


Рис. 3. Изменение коэффициентов Джини по толщине ствола деревьев (*а*) и высоте подроста (*б*) в ельниках: 1 – разнотравно-зеленомошном (ППП 6); 2 – сфагновом (ППП 7); 3 – морошково-сфагновом (ППП 8); 4 – зеленомошном (ППП 10); 5 – кустарничково-долгомошном (ППП 12)

Fig. 3. The variation of Gini coefficient values for tree stem thickness (*a*) and undergrowth height (*b*) in spruce forests: 1 – forb-green moss (PSP 6); 2 – sphagnum (PSP 7); 3 – cloudberry-sphagnum (PSP 8); 4 – green moss (PSP 10); 5 – shrubby-long moss (PSP 12)

Оценки жизненного состояния древостоев по числу деревьев и объему стволовой древесины показали схожие результаты. При этом максимальные расхождения не превышают 16 %, а среднее расхождение составляет 5 % (рис. 4). Оба этих метода выявили тенденцию улучшения жизненного состояния как древостоев, так и подроста (табл. 4). В 2005 г. большинство древостоев было классифицировано нами как ослабленные ($79 < L < 50$ %), в то время как в 2013 и 2022 гг. все насаждения охарактеризованы как здоровые ($L \geq 80$ %). Также наблюдались изменения в категориях жизненного состояния у подроста под пологом ельников разных типов, причем за период наблюдений они перешли из ослабленного состояния в здоровое. Однако подрост в ельнике разнотравно-зеленомошном находится в стадии сильного ослабления ($20 < L < 49$ %). Наибольшей жизненностью обладают древостой и подрост в ельнике зеленомошном.

Поврежденность изучаемых древостоев за время наблюдений сократилась в 2–6 раз. В 2005 г. мы определяли их как поврежденные ($20 < D < 49$ %)

или имеющие начальную стадию повреждения ($11 < D < 19\%$), а в 2022 г. лишь древостой ельника сфагнового сохранил признаки поврежденности ($D > 20\%$).

Рис. 4. Жизненное состояние древостоев: L_n – на основе количества деревьев; L_v – на основе объема стволов (неокрашенные круги – наибольшие различия показателей)
Fig. 4. The vitality status of stands: L_n – based on the number of trees; L_v – based on the volume of stems (uncoloured circles – the largest deviations in indicators)

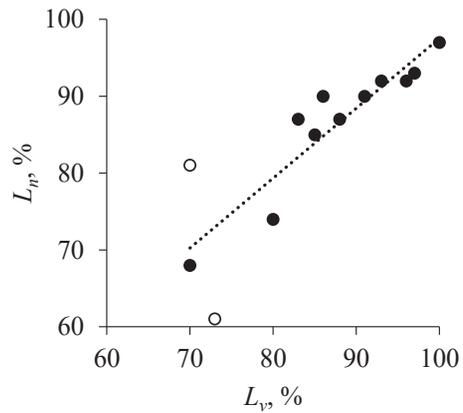


Таблица 4

Динамика жизненного состояния ельников, %
The dynamics of the vitality status of spruce forests, %

№ ППП (год учета)	Древостой				Подрост
	L_n	D_n	L_v	D_v	L_n
6 (2005)	61	43	73	29	35
6 (2013)	85	24	85	16	50
6 (2022)	92	14	96	6	43
7 (2005)	68	33	70	31	62
7 (2013)	90	21	91	16	80
7 (2022)	87	36	88	34	85
8 (2005)	74	30	80	22	68
8 (2013)	87	24	83	26	73
8 (2022)	92	12	93	9	85
10 (2006)	90	13	86	19	93
10 (2022)	97	6	100	3	98
12 (2006)	81	34	70	40	75
12 (2022)	93	12	97	8	90

По материалам исследований ельников Крайнего Севера С.В. Ярославцевым [28] выявлено, что при среднем диаметре деревьев ели ≤ 14 см коэффициент вариации толщины ствола составляет 24–41 %, а по данным Б.А. Семенова с соавторами [19], этот показатель колеблется в пределах 26–115 % (чаще 30–46 %). Наши результаты сопоставимы с результатами авторов. По наблюдениям 2005–2006 гг. интервал коэффициента вариации деревьев ели при средней толщине ствола ≤ 14 см составлял 21–33 %, а в 2022 г. – 30–42 %.

Особенностью распределения деревьев по диаметру ствола притундровых ельников является значительное накопление мелких особей с последующим порой резким уменьшением их численности по мере увеличения размера ствола. Такая структура накопления молодых деревьев также была обнаружена С.В. Ярославцевым [28] для распределения деревьев по диаметру в ельниках Крайнего Севера. В то же время динамика размерной структуры продуктивно-

го древостоя ельника разнотравно-зеленомошного сопоставима со среднетаежными ельниками, развивающимися на автоморфных подзолистых почвах [12]. В этих лесах отмечается пологое и растянутое по вариационному ряду распределение деревьев с максимальной численностью в средних ступенях. Исследования Б.А. Семенова с соавторами [19], а также результаты данной работы показывают, что наибольшее количество молодых деревьев в спелых и перестойных древостоях ельников накапливается в ценопопуляциях, формирующихся на болотно-подзолистых почвах. Избыточное увлажнение почв в ельниках сфагновом и морошково-сфагновом способствует развитию сосны, что связано с ее адаптивными способностями [21], а длительное отсутствие низовых пожаров в ельнике зеленомошном на маломощных песчаных подзолистых почвах ведет к полному отсутствию возобновления лиственницы [7]. Береза соседствует с елью как в древостое, так и в подросте на протяжении всего периода исследования. Эта порода практически всегда присутствует в коренных еловых лесах на европейском Севере [9].

Размерная структура подроста менее стабильна во времени по сравнению со структурой древостоев, что, на наш взгляд, связано с суровыми природными (климатическими и почвенными) условиями на Крайнем Севере, которые ограничивают процесс лесовозобновления. Для региона характерны нерегулярность плодоношения, объясняющаяся в основном недостатком тепла, низкая всхожесть семян, а также развитие травяно-кустарничкового и особенно мохово-лишайникового покровов [8, 17, 19].

Вероятно, в формулу оценки жизненного состояния притундровых фитоценозов следует вводить дополнительные коэффициенты, учитывающие действующие на территории экстремальные условия среды и реакцию деревьев на них [15]. Однако использование разных методик расчетов затруднит сравнение результатов исследования с данными для сопредельных территорий и характеристику динамики.

В отличие от притундровых ельников, для которых мы отметили улучшение жизненного состояния древостоев и подростов, в среднетаежных ельниках Печорского бассейна происходит некоторое ослабление как верхних ярусов древесного полога, так и нижних – подростов [12]. Мы не исключаем, что изменение температурных условий в регионе из-за современного потепления климата может оказать положительное воздействие на состояние притундровых ельников, ограничивающим фактором развития которых является недостаток тепла [31]. Из-за неполной изученности растительных сообществ, их толерантности и способности к адаптации к настоящим климатическим изменениям невозможно провести сопоставление последствий с аналогичными событиями [11].

Заключение

В течение наблюдаемого 17–18-летнего периода развития еловых лесов притундровой зоны ценопопуляции ели оставались господствующими в сообществе. Лесовозобновительный процесс в целом был непрерывным. Жизненное состояние древесного яруса улучшилось.

Длительные стационарные исследования позволяют изучить изменчивость в растительных сообществах и их реакцию на глобальные изменения, что способствует лучшему пониманию механизмов, лежащих в основе этих изменений, а также путей реагирования на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев В.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с.
Alekseev V.A. *Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution*. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p. (In Russ.).
2. Бебия С.М. Дифференциация деревьев в лесу, их классификация и определение жизненного состояния деревьев // Лесоведение. № 4. 2000. С. 35–43.
Bebiya S.M. Differentiation of Trees in the Forest, Their Classification and Determination of Their Vital Status. *Lesovedenie*, 2000, no. 4, pp. 35–43. (In Russ.).
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет, 2019. 79 с.
A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2018. Moscow, Roshydromet Publ., 2019. 79 p. (In Russ.).
4. Евдокимов А.С., Ярмишко В.Т. Структура древесного яруса лесных сообществ центральной части Кольского полуострова, формируемая при снижении аэротехногенной эмиссии // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31, № 1. С. 115–126.
Evdokimov A.S., Yarmishko V.T. The Tree Layer Structure of Forest Communities of the Kola Peninsula Central Part Formed When Aerotechnogenic Emissions Reduced. *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* = RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 2023, vol. 31, no. 1, pp. 115–126. (In Russ.).
<http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-1-115-126>
5. Зиганшин Р.А. Площадь выявления насаждений и необходимое число наблюдений в древостоях элементов леса // Лесоведение. 2017. № 6. С. 464–477.
Ziganshin R.A. Evaluation of Confidence of Observations during Forest Taxation. *Lesovedenie*, 2017, no. 6, pp. 464–477. (In Russ.). <http://doi.org/10.7868/S0024114817060109>
6. Катютин П.Н., Горшков В.В. Жизненное состояние, скорость роста и надземная фитомасса *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в средневозрастных северотаежных лесах // Растит. ресурсы. 2020. Т. 56, № 2. С. 99–111.
Katyutin P.N., Gorshkov V.V. Vitality, Growth Rate and Aboveground Phytomass of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) in Middle-Aged Northern Taiga Forests. *Rastitelnye resursy*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 99–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033994620020065>
7. Кашин В.И., Козобродов А.С. Лиственничные леса европейского севера России. Архангельск: Арх. фил. Рус. географ. о-ва РАН, 1994. 222 с.
Kashin V.I., Kozobrodov A.S. *Larch Forests of the European North of Russia*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Branch of the Russian Geographical Society of the Russian Academy of Sciences, 1994. 222 p. (In Russ.).
8. Козубов Г.М. Биология плодоношения хвойных на Севере. Л.: Наука, 1974. 135 с.
Kozubov G.M. *Biology of Fruiting of Conifers in the North*. Leningrad, Nauka Publ., 1974. 135 p. (In Russ.).
9. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. СПб.: Наука, 2006. 337 с.
Indigenous Spruce Forests of the North: Biodiversity, Structure, Functions. St. Petersburg, Nauka Publ., 2006. 337 p. (In Russ.).
10. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука. 1990. 200 с.
Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution. Ed. by V.A. Alekseev. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p. (In Russ.).
11. Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546.
Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Yu., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M. A Role of Forests in Natural Sys-

tems Adaptation to Climate Change. *Lesovedenie*, 2021, no. 5, pp. 531–546. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>

12. Манов А.В., Кутявин И.Н. Динамика структуры и состояния древесного яруса среднетаежных коренных ельников предгорий Северного Урала // *Лесоведение*. 2023. № 6. С. 587–595.

Manov A.V., Kutuyavin I.N. Tree Storey Structure and Condition Dynamics in Middle-Taiga Native Spruce Forests of the Northern Ural Foothills. *Lesovedenie*, 2023, no. 6, pp. 587–595. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114823050054>

13. Манов А.В., Кутявин И.Н. Мониторинг лесных земель. Сыктывкар: СЛИ, 2023. 52 с.

Manov A.V., Kutuyavin I.N. *Monitoring of Forest Lands: Textbook*. Syktyvkar, Syktyvkar Forest Institute Publ., 2023. 52 p. (In Russ.).

14. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с. *Methods of Studying Forest Communities*. St. Petersburg: Institute of Chemistry of St. Petersburg State University, 2002. 240 p. (In Russ.).

15. Мозолева Е.Г., Шарпа Т.В. Некоторые результаты применения индекса состояния насаждений при мониторинге // *Лесн. вестн.* 2003. № 2. С. 142–145.

Mozolevskaya E.G., Sharapa T.V. Some Results of Application of the Index of Plantation Condition in Monitoring. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2003, no. 2, pp. 142–145. (In Russ.).

16. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Производительность и возобновление насаждений притундрового леса в Республике Коми // *Изв. Коми науч. центра Уральск. отд. Рос. акад. наук. Сер.: С.-х. науки*. 2022. № 6(58). С. 71–77.

Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. Capacity and Regeneration of Subtundra Forest Stands in the Komi Republic. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo oteleniya Rossijskoj akademii nauk. Seriya: Sel'skokhozyajstvennyye nauki = Proceedings of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series: Agricultural Sciences*, 2022, no. 6(58), pp. 71–77. (In Russ.).

17. Пристова Т.А., Манов А.В., Загирова С.В. Оценка запасов органического вещества напочвенного покрова и подстилки в еловых и березовых фитоценозах на Приполярном Урале // *Растит. ресурсы*. 2016. Т. 52, № 2. С. 282–294.

Pristova T.A., Manov A.V., Zagirova S.V. Estimation of Stock of Organic Substance of Ground Vegetation and Forest Litter of Spruce and Birch Phytocoenoses in the Subpolar Urals. *Rastitelnye resursy*, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 282–294. (In Russ.).

18. Робакидзе Е.А., Торлопова Н.В. Мониторинг состояния ельников в условиях загрязнения целлюлозно-бумажного производства // *Растит. ресурсы*. 2018. № 54(1). С. 42–58.

Robakidze E.A., Torloпова N.V. Monitoring of the Spruce Forests Status under Pollution from Pulp and Paper Mill Emissions. *Rastitelnye resursy*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 42–58. (In Russ.).

19. Семенов Б.А., Цветков В.Ф., Чибисов Г.А., Елизаров Ф.П. Притундровые леса Европейской части России: природа и ведение хозяйства. Архангельск: Пресс-А, 1998. 332 с.

Semenov B.A., Tsvetkov V.F., Chibisov G.A., Elizarov F.P. *Subtundra Forests of the European Part of Russia: Nature and Management*. Arkhangelsk, Press-A Publ., 1998. 332 p. (In Russ.).

20. Соловьев В.М., Соловьев М.В. Рост и дифференциация древесных растений – эколого-биологическая основа изучения и формирования древостоев лесных экосистем // *Аграр. вестн. Урала*. 2012. № 2(94). С. 44–47.

Solov'ev V.M., Solov'ev M.V. The Growth and Differentiation of Woody Plants – Ecological and Biological Basis for the Study and Formation of Stands of Forest Ecosystems. *Agrarnyy vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*, 2012, no. 2(94), pp. 44–47. (In Russ.).

21. Тарханов С.Н., Пинева Е.А., Аганина Ю.Е. Особенности адаптации разных форм сосны обыкновенной в условиях длительного избыточного увлажнения почв // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2021. № 2. С. 30–44.

Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E. Features of Adaptation of Different Forms of Scots Pine under Conditions of Prolonged Excessive Soil Moistening. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 2, pp. 30–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-30-44>

22. Уткина И.А., Рубцов В.В. Современные представления о влиянии изменений климата на взаимодействие лесных деревьев и насекомых-фитофагов // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 6. С. 5–12.

Utkina I.A., Rubtsov V.V. Modern Ideas about the Impact of Climate Change on Interactions of Forest Trees and Phytophagous Insects. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 5–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-6-5-12>

23. Худяков О.И., Решоткин О.В. Климатическая норма температуры как критерий оценки термообеспеченности и изменчивости климата подзолистых почв Тимано-Печорской провинции // Вестн. ОГУ. 2011. № 12(131). С. 256–261.

Khudyakov O.I., Reshotkin O.V. Climatic Norm of the Temperature as a Criterion of the Estimate of Thermal Security and Variability of the Climate of Podzol Soils in Timano-Pechorskaya Region. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 12(131), pp. 256–261. (In Russ.).

24. Цветков В.Ф. Лесной биогеоценоз. Архангельск: АГТУ, 2004. 268 с.

Tsvetkov V.F. *Forest Biogeocenosis*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2004. 268 p. (In Russ.).

25. Цветков П.А., Киришева Д.А. Влияние рекреации на естественное возобновление сосны обыкновенной // Хвойные бореал. зоны. 2004. Вып. 2. С. 61–65.

Tsvetkov P.A., Kirisheva D.A. The Influence of Recreation on Natural Regeneration of Scots Pine. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2004, iss. 2, pp. 61–65. (In Russ.).

26. Чертовской В.Г., Семенов Б.А., Шамин А.А. Практическое пособие по исследованию притундровых лесов. Архангельск: АИЛиЛХ, 1977. 35 с.

Chertovskoj V.G., Semenov B.A., Shamin A.A. *A Practical Guide to Studying Subtundra Forests*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Forest and Forest Chemistry Institute Publ., 1977. 35 p. (In Russ.).

27. Чибисов Г.А., Цветков В.Ф., Семенов Б.А. Крайне северные леса и проблемы их сохранения // Изв. вузов. Лесн. журн. 1992. № 4. С. 7–11.

Chibisov G.A., Tsvetkov V.F., Semenov B.A. Far North Forests and Problems of Their Conservation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1992, no. 4, pp. 7–11. (In Russ.).

28. Ярославцев С.В. Особенности строения ельников Крайнего Севера // Изв. вузов. Лесн. журн. 1992. № 4. С. 29–32.

Yaroslavtsev S.V. Structural Features of Spruce Forests in the Far North. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1992, no. 4, pp. 29–32. (In Russ.).

29. Bobkova K.S., Manov A.V. Health State of Native Spruce Stands and Saplings in the Northern Timberline Forests of the Pechora Basin. *Contemporary Problems of Ecology*, 2012, vol. 5, pp. 152–158. <https://doi.org/10.1134/S1995425512020035>

30. Damgaard C., Weiner J. Describing Inequality in Plant Size or Fecundity. *Ecology*, 2000, vol. 81, iss. 4, pp. 1139–1142.

[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[1139:DIIPSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[1139:DIIPSO]2.0.CO;2)

31. Manov A.V., Kutuyavin I.N. Space-Time Variability of the Climatic Signal in Spruce Radial Growth in the Pechora River Basin. *Contemporary Problems of Ecology*, 2022, vol. 15, pp. 872–882. <https://doi.org/10.1134/S1995425522070174>

32. McBean G., Alekseev G., Chen D., Forland E., Fyfe J., Groisman P.Y., King R., Melling H., Vose R. Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. *Arctic Climate: Past and Present*. Cambridge, Cambridge University Press, 2005, chapt. 2, pp. 21–60.

33. Thom D., Seidl R. Natural Disturbance Impacts on Ecosystem Services and Biodiversity in Temperate and Boreal Forests. *Biological Reviews*, 2016, vol. 91, iss. 3, pp. 760–781. <https://doi.org/10.1111/brv.12193>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 632.03

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-42-54

Биологическая деструкция древесины кленов в урбанизированной среде

И.А. Попкова[✉], канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-1329-2022](https://orcid.org/0000-0002-8180-5673),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8180-5673>

О.С. Залывская, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAU-4901-2020](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; i.olupkina@narfu.ru[✉], o.zalyvskaya@narfu.ru

Поступила в редакцию 02.04.24 / Одобрена после рецензирования 27.06.24 / Принята к печати 28.06.24

Аннотация. Исследовано санитарное состояние кленов европейской флоры, произрастающих в условиях г. Архангельска. Процесс деструкции древесины является обычным для природных экосистем. В то же время развивающаяся в стволе гниль приводит к снижению механической прочности дерева, делая его потенциально опасным в городской среде. Интенсивность повреждений и скорость их распространения по стволу могут значительно варьироваться. Цель исследования – оценка характера деструкции древесины клена остролистного и клена Шведлера, произрастающих в дендрологическом саду им. И.М. Стратоновича, при помощи импульсного томографа «Арботом». Дендросад располагается в черте г. Архангельска. Проведено обследование таксонов по общепринятым методикам. На начальном этапе измерены биометрические характеристики деревьев и выполнена визуальная оценка их санитарного состояния. Используя томограф, произвели замеры на различных высотах ствола, что позволило получить полную картину внутренней структуры древесины и выявить возможные зоны разрушения, которые не видны при визуальном обследовании. Полученные данные показали, что клен остролистный и его разновидность имеют различия в устойчивости к внутренним гнилям. Зафиксировали наличие значительных нарушений у образцов клена остролистного, что свидетельствует о меньшей жизнеспособности данного вида. В то же время клен Шведлера характеризуется большей устойчивостью к поражениям гнилью, что может говорить о его превосходящей адаптивности к местным климатическим условиям. При помощи корреляционного анализа установлено, что взаимосвязь между возрастом кленов и скоростью прохождения импульса в древесине отсутствует. Результаты исследования могут стать основой для работ по интродукции и селекции видов кленов для северного региона, а также помогут в разработке рекомендаций по уходу за насаждениями и раннему диагностированию заболеваний деревьев. Применение импульсной томографии не только позволяет выявить уже существующие повреждения древесины, но и служит профилактическим инструментом, предотвращающим распространение болезней. Разработка программ по регулярному осмотру деревьев с использованием данной технологии может существенно повысить эффективность мероприятий по их защите.

Ключевые слова: импульсный томограф, стволовая гниль, Арботом, клен, *Acer L.*, городская среда, Архангельск



Для цитирования: Попкова И.А., Залывская О.С. Биологическая деструкция древесины кленов в урбанизированной среде // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 42–54. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-42-54>

Original article

Biological Degradation of Maple Wood in an Urban Environment

Irina A. Popkova[✉], Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAE-1329-2022](https://orcid.org/0000-0002-8180-5673),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8180-5673>

Olga S. Zalyvskaya, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAZ-4901-2020](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; i.olupkina@narfu.ru[✉], o.zalyvskaya@narfu.ru

Received on April 2, 2024 / Approved after reviewing on June 27, 2024 / Accepted on June 28, 2024

Abstract. The sanitary condition of maples of the European flora growing in the conditions of the city of Arkhangelsk has been investigated. The process of wood degradation is common in natural ecosystems. At the same time, the rot developing in the stem leads to a decrease in the mechanical strength of the tree, making it potentially dangerous in an urban environment. The intensity of damage and the rate of its spread along the stem can vary significantly. The aim of the study has been to assess the nature of wood degradation of Norway maple and Schwedler maple growing in the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich using the Arbotom impulse tomograph. The dendrological garden is located within the city limits of Arkhangelsk. A survey of taxa has been carried out using generally accepted methods. At the initial stage, the biometric characteristics of the trees have been measured and a visual assessment of their sanitary condition has been performed. Using the tomograph, measurements have been taken at various heights of the stem, which has made it possible to obtain a complete picture of the internal structure of the wood and identify possible areas of destruction that are not visible during visual inspection. The data obtained has demonstrated that Norway maple and its variety have differences in resistance to internal rot. Significant disturbances have been recorded in Norway maple samples, indicating the lower viability of this species. At the same time, Schwedler maple is characterized by greater resistance to rot damage, which may indicate its superior adaptability to local climatic conditions. Correlation analysis has shown that there is no relationship between the age of the maples and the speed of pulse propagation in the wood. The results of the study can become the basis for work on the introduction and breeding of maple species suitable for the northern region, as well as help in developing recommendations for plant care and early diagnosis of tree diseases. The use of impulse tomography not only allows the detection of existing wood damage, but also serves as a tool to prevent the spread of diseases. Developing programs for regular inspection of trees using this technology can significantly increase the effectiveness of tree protection measures.

Keywords: impulse tomograph, stem rot, Arbotom, maple, *Acer* L., urban environment, Arkhangelsk

For citation: Popkova I.A., Zalyvskaya O.S., Biological Degradation of Maple Wood in an Urban Environment. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 42–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-42-54>

Введение

Культивирование новых видов растений способствует расширению хозяйственного использования земельных ресурсов северных регионов, а также улучшению качества городской среды и повышению комфортности проживания в северных населенных пунктах [1, 18, 19].

Клены европейской флоры широко используются в озеленении благодаря своей устойчивости и долговечности в урбанизированной среде. Они обеспечивают улучшение эстетических и санитарно-гигиенических свойств городских насаждений.

Антропогенные и климатические факторы могут существенно повлиять на состояние древесины, что ослабляет деревья, делая их более восприимчивыми к болезням и вредителям [5]. Развивающаяся в стволе гниль уменьшает механическую прочность дерева и повышает риск его падения.

Гниение древесины является широко распространенным процессом в природе, которому подвергаются не только мертвая древесина, но и древесина старых и молодых растущих деревьев [3]. Исследованием данного процесса уже давно занимаются ботаники и лесоводы [2, 4, 7–9, 15–20, 22]. В условиях северного климата, где температура и осадки могут варьироваться, этот процесс проявляется особенно интенсивно. При интродукции новых видов древесных растений в северные регионы изучение их устойчивости критически важно. Непригодные для таких условий виды могут быстро деградировать. Таким образом, знание о состоянии древесины растений становится практическим инструментом для лесоводов, ботаников и работников зеленого строительства.

Гниль в древесине по расположению в стволе подразделяется на ядровую, заболонную и ядрово-заболонную [4]. В зависимости от вертикального размещения выделяют комлевою (до 2,0 м), срединную, вершинную, сквозную (по всей длине ствола) и локализованную в ветвях. Также следует отметить, что некоторые виды ксилотрофных грибов в основном разрушают целлюлозу, в то время как другие специализируются на разрушении лигнина.

Кроме стволовых гнилей, существуют также корневые и комлево-корневые гнили, которые также вызываются грибами-ксилотрофами. Эти грибы распространяются не только с помощью спор, но и через контакт пораженных и здоровых корней, что приводит к куртинному характеру развития корневых гнилей в насаждениях. Темп гниения и скорость распространения гнили по стволу не всегда являются одинаково интенсивными.

Признаки наличия гнили в стволе дерева могут включать в себя такие внешние диагностические характеристики, как сухобочины, дупла, вздутия ствола, плодовые тела ксилотрофных грибов, смолотечения и снижение линейного прироста. Тем не менее, в большинстве случаев на основании лишь этих внешних признаков невозможно достоверно оценить степень аварийности дерева.

Иногда признаки гнили могут быть видимы, но сама гниль отсутствует. В других случаях гниль может находиться в стволе, однако внешних проявлений не иметь. Для точного определения толщины остаточных стенок древесины, размеров и протяженности гнили, а также других показателей необходимо применение инструментальной диагностики внутреннего состояния дерева.

Одним из современных способов изучения внутренних разрушений ствола является импульсная томография. Многие исследователи применяли данную

технологии для установления наличия стволовых гнилей у тех или иных пород [6, 9, 11–15, 19, 22].

Оценка состояния древесной растительности, ограниченная лишь видимой областью, не всегда бывает точной. Некоторые процессы разрушения, происходящие внутри, могут довольно долго не влиять на внешний вид дерева, поэтому для более корректного анализа состояния растений необходимо проводить исследования при помощи специального оборудования на различной высоте ствола.

Характер деструкции древесины мы рассматриваем как тест-маркер устойчивости интродуцированных видов дендрофлоры в северных условиях.

Цель исследования – оценка характера деструкции древесины представителей европейской флоры *Acer platanoides* L. и его разновидности *A. var. schwedleri* К.Кос. при помощи импульсного томографа «Арботом».

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на территории Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, в центре г. Архангельска. Одним из самых широко распространенных родов является клен (*Acer* L.). Наиболее часто применяемый в озеленении северных городов представитель данного рода – клен остролистный и его декоративные формы и сорта [10]. В дендросаду произрастают 11 экземпляров клена остролистного и 10 экземпляров декоративной формы клена остролистного – клена Шведлера, которые выбраны для исследования. Оценивалось их санитарное состояние по методике, изложенной в постановлении Правительства РФ от 09.12.2020 № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах», фиксировались биометрические показатели (высота, диаметр ствола), возраст. Высоту измеряли при помощи лазерного высотомера-дальномера Forestry Pro, диаметр ствола – электронной мерной вилки Haglof MD II, диаметр кроны устанавливали по общепринятой методике. Для определения наличия стволовых гнилей и различных деструкций использовали импульсный томограф «Арботом» [21]. Томограмма Arbotom – это изображение поперечного сечения ствола дерева, полученное путем измерения скорости распространения звуковых волн через древесину. Скорость звука зависит от плотности древесины: более плотная древесина пропускает звук быстрее, менее плотная (например, поврежденная гнилью) – медленнее. Чем ниже скорость прохождения звуковой волны, тем выше степень разрушения. Цвета на томограмме обычно кодируют скорость звука. Часто используются следующие цвета: синий или зеленый (обычно соответствуют здоровой, плотной древесине, звук проходит быстро); желтый или оранжевый (может указывать на начальную стадию гниения или уплотнение древесины – реакционную зону, звук проходит медленнее; красный, или коричневый, или фиолетовый (обычно соответствуют зонам с деструкцией, полостями или другими дефектами), звук проходит медленно или не проходит).

Условное распределение для интерпретации результатов, выполненное по шкале предлагаемой И.А. Мельничук, М.Й.С. Йассин, О.А. Черданцевой [9]: синий цвет – естественная плотность древесины, голубой – пониженная плотность, зеленый – патологическое снижение плотности, желтый – начало

разрушения межволоконных связей, красный – образование некротных полостей; фиолетовый – наличие пустот (дупел).

Согласно методике на каждом исследуемом экземпляре в комлевой части ствола (условно 0 м) и на высоте груди (1,3 м) через равное расстояние закрепляли датчики для того, чтобы зафиксировать развитие деструкции по высоте ствола. После запуска программы и легкого простукивания по ударному штифту каждого сенсора на экран выводились томограммы, по которым строилась полная картина состояния древесины, наличия и изменения стволовых патологий (рис. 1).



Рис. 1. Обследование ствола: *а* – установка датчиков на высоте 1,3 м; *б* – получение информации с датчиков

Fig. 1. An examination of the stem: *a* – installation of sensors at a height of 1.3m; *b* – obtaining data from the sensors

Настройку графических изображений – томограмм – производили с учетом рекомендаций О.Н. Тюкавиной [14]. Математическую обработку данных выполнили при помощи пакета Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам визуальной оценки жизненного состояния исследуемых таксонов установлено, что 60 % экземпляров клена остролистного здоровы и 40 % сильно ослаблены. Все клены Шведлера находились в ослабленном состоянии. Для таких растений характерно наличие на стволах плодовых тел различных трутовиков, усыхание ветвей. У 25 % экземпляров отмечены дупла, у 8 % – снеголомы (табл. 1).

Анализ полученных диаграмм показал, что в древесине стволов есть различные дефекты: сниженная плотность, дупла и некротные полости.

Установлено, что 80 % исследованных кленов остролистных в возрасте 30 лет практически здоровы – участки стволов являются неповрежденными, но наблюдается патологическое уменьшение плотности древесины. У 20 % экземпляров данного вида в этом же возрасте отмечается начальная стадия развития деструкции и пониженная плотность древесины.

Таблица 1

Категории санитарного состояния кленов
The categories of maple tree condition

Наименование таксона	Возраст, лет/ количество экземпляров, шт.	Диапазон (минимум–максимум)			Категория санитарного состояния	Примечание
		высота, м	диаметр ствола, см	диаметр кроны, м		
Клен остролистный	30/10	15,5–18,5	15,2–20,1	3,6–4,0	Здоровые	Без признаков ослабления
	90/1	21,8	29,0	4,5	Сильно ослабленные	Наличие плодовых тел трутовика опаленного (<i>Bjerkandera adusta</i> (Willd.) P.Karst.), местные повреждения ствола, кора в трещинах
Клен Шведлера	77/10	22,0–25,0	12,0–22,0	3,8–4,7	Ослабленные	Местные повреждения ствола, дупла, плодовые тела трутовика ложного (<i>Phellinus igniarius</i> L. Quel.) на 1 экземпляре

На томограммах присутствуют небольшие по площади красно-фиолетовые зоны, указывающие на наличие полостей. Однако эти зоны находятся в разных секторах и на различных высотах, что не подтверждает однозначное вертикальное распространение гнили из одного очага. Это могут быть отдельные локальные очаги. Для обеих высот преобладают желтый и оранжевый цвета, указывая на снижение плотности и неоднородность древесины. Вероятность наличия локальных очагов гнили значительна на обеих высотах. Визуально повреждений на кленах не отмечено (рис. 2).

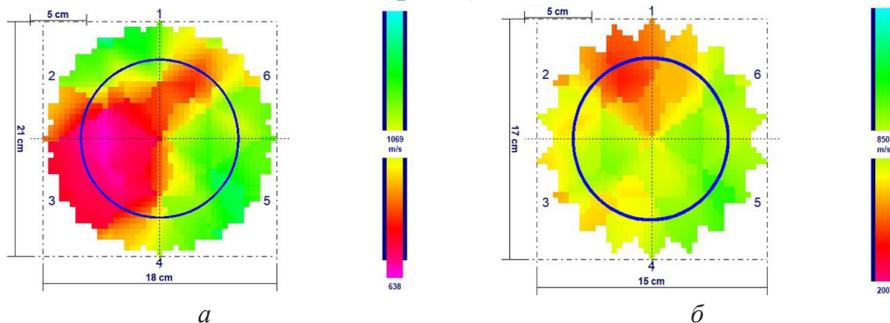


Рис. 2. Двумерные томограммы стволов клена остролистного (30 лет):
 а – нулевая координатная точка; б – высота 1,3 м

Fig. 2. The two-dimensional tomograms of Norway maple stems (30 years old):
 а – zero coordinate point; б – height of 1.3 m

При обследовании клена остролистного в возрасте 90 лет, с внешними признаками повреждений коры и наличием плодовых тел грибов на стволе, выявлены и внутренние повреждения древесины. Томограмма на нулевой координатной точке высоты ствола (НКТ) показывает деструктивную картину. Большая часть изображения окрашена в красный и фиолетовый цвета, что указывает

на наличие крупных полостей и обширной зоны некротизации в основании ствола. Зона с полостями занимает превосходящую часть поперечного сечения ствола, имеет неправильную форму (рис. 3, *a*).

На томограмме поперечного среза на высоте 1,3 м цветовая гамма более разнообразная, чем на НКТ. Присутствуют красный, фиолетовый, зеленый, желтый и оранжевый цвета. Полости в древесине есть, но они значительно меньше по размеру, чем на НКТ. Это говорит о том, что разрушение, вероятно, начало развиваться в основании ствола и распространилось вверх, но не на всю высоту в таком же объеме (рис. 3, *б*).

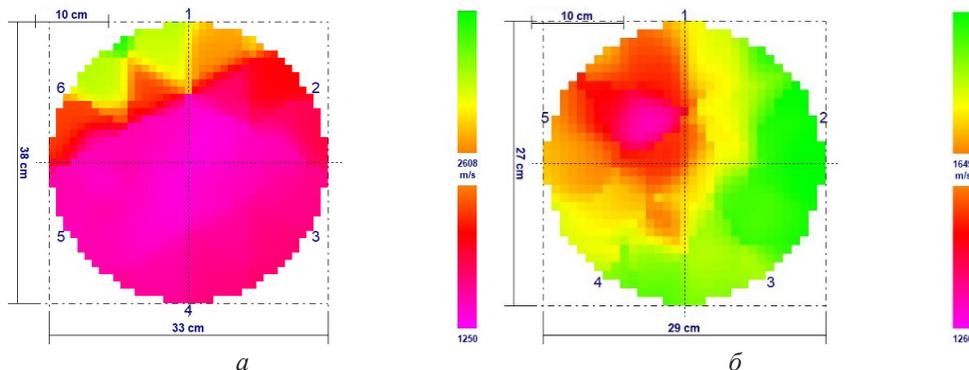


Рис. 3. Двумерные томограммы стволов клена остролистного (90 лет):
a – нулевая координатная точка; *б* – высота 1,3 м

Fig. 3. The two-dimensional tomograms of Norway maple stems (90 years old):
a – zero coordinate point; *б* – height of 1.3 m

На томограммах 90 % кленов Шведлера на НКТ высоты ствола преобладают синий и зеленый цвета, это указывает на хорошее состояние древесины в целом на данном уровне. Есть значительные зоны желтого цвета, которые свидетельствуют о сниженной плотности и неоднородности древесины. Данное обстоятельство является признаком начальной стадии гниения, но более вероятно, что это связано с особенностями строения корневой системы и корневой шейки. У основания ствола часто наблюдаются изменения в плотности древесины из-за перехода к корням. Зоны желтого цвета неоднородные, вытянутые, отмечается некоторая асимметрия, что характерно для корневой шейки (рис. 4, *a*).

На томограммах поперечного среза ствола на высоте 1,3 м у большинства экземпляров преобладают желто-зеленые цвета, с небольшими вкраплениями синего цвета. Желтая зона, занимающая большую часть изображения, указывает на снижение плотности и неоднородность древесины, либо на начальные этапы разложения. Зона неоднородности значительная. Распределение цветов более симметрично, чем на НКТ. На основании представленных томограмм нет явных признаков значимого распространения гнили вверх по стволу (рис. 4, *б*).

Еще один экземпляр клена Шведлера с плодовыми телами плоского трутовика на стволе и раковыми язвами оказался с внутренними повреждениями древесины. Томограмма поперечного среза в основании ствола имеет смешанную цветовую гамму, преобладают желтый и зеленый цвета, значительна также зона оранжевого цвета. Оранжевый цвет указывает на пониженную плотность и неоднородность древесины, возможные начальные стадии гниения. Зона неоднородности большая, неправильной формы, вытянутая (рис. 5, *a*).

На изображении поперечного среза ствола на высоте 1,3 м присутствуют синий и зеленый цвета, но значительную часть занимает оранжевый цвет, сигнализирующий о сниженной плотности древесины. Зона этого цвета, хотя не является свидетельством образования полостей, говорит об общем снижении плотности, вероятно, связанном с начальными, диффузными процессами гниения. Зоны с различной плотностью распределены более равномерно, чем на НКТ (рис. 5, б).

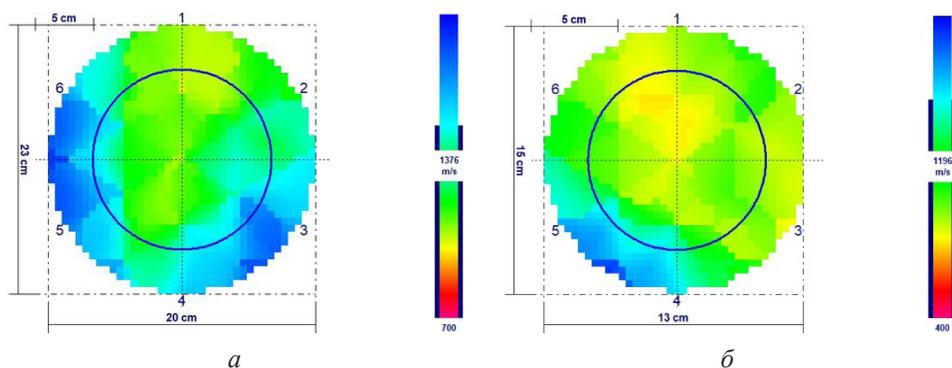


Рис. 4. Двумерные томограммы стволов клена Шведлера: *a* – нулевая координатная точка; *б* – высота 1,3 м

Fig. 4. The two-dimensional tomograms of Schwedler maple stems: *a* – zero coordinate point; *б* – height of 1.3 m

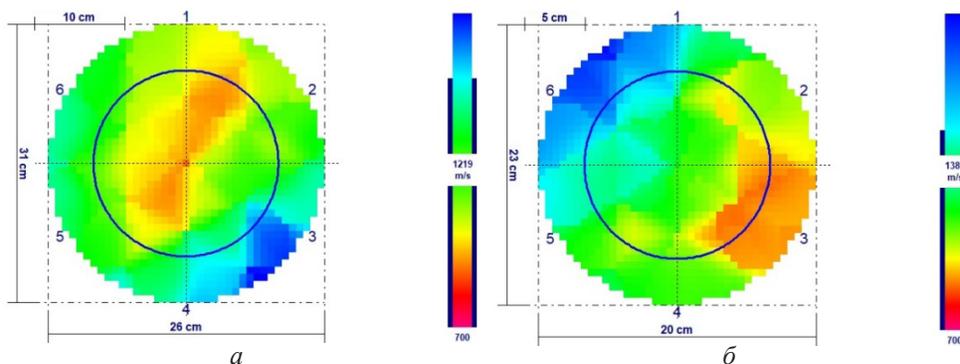


Рис. 5. Двумерные томограммы ствола клена Шведлера с наличием внешних повреждений коры: *a* – нулевая координатная точка; *б* – высота 1,3 м

Fig. 5. The two-dimensional tomograms of the stem of the Schwedler maple with external damage to the bark: *a* – zero coordinate point; *б* – height of 1.3 m

На основании изображений данного экземпляра можно сделать вывод, что у основания ствола есть явный признак проблемы – обширная зона пониженной плотности, которая с большой вероятностью является начальной стадией деструкции. Далее, вверх по стволу, наблюдается общее снижение плотности древесины и, хотя нет красных или фиолетовых зон, нельзя исключить диффузное распространение начальных стадий гниения вверх. Общее снижение плотности требует внимания. Если дерево находится в месте, где его падение может представлять опасность, необходимо принять меры предосторожности. В связи с высокой вероятностью наличия гнили в основании ствола рекомендуется рассмотреть возможность проведения резистографии.

Таким образом, наблюдаются существенные различия в состоянии древесины обследованных таксонов. Экземпляры клена остролистного находятся в значительно худшем состоянии, чем клена Шведлера.

Патологическое снижение плотности в разной степени выраженности показывают томограммы всех деревьев. Начало разрушения межволоконных связей – также распространенный признак, особенно на высоте 1,3 м у клена остролистного и на обеих высотах у клена Шведлера. Образование некротических полостей присутствует у большинства экземпляров клена остролистного, а у экземпляра в 90-летнем возрасте – в очень большом объеме в основании ствола. Наличие пустот (дупел) обнаружено только у 90-летнего клена остролистного (табл. 2).

Таблица 2

Результаты обработки импульсной томографии кленов
The results of processing impulse tomography of the maples

Наименование таксона	Возраст, лет	Диаметр ствола, см*	Скорость прохождения импульса, м/с, на высоте:			
			НКТ		1,3 м	
			max	min	max	min
Клен остролистный	30	$\frac{66}{54}$	1685	745	1399	278
	90	$\frac{38}{29}$	3967	1250	2039	1260
Клен Шведлера	77	$\frac{72}{48}$	2052	1225	2329	467

*В числителе – НКТ; в знаменателе – высота 1,3 м.

Корреляционный анализ результатов исследования позволил установить, что прямой взаимосвязи состояния внутренней части древесины растений с их возрастом нет (табл. 3).

Таблица 3

Корреляционный анализ данных импульсной томографии кленов
The correlation analysis of maple impulse tomography data

	Возраст, лет	Диаметр ствола, НКТ	Скорость распространения импульса (v), м/с		Диаметр ствола, 1,3 м	Скорость распространения импульса, м/с	
			max	min		max	min
Возраст, лет	1						
Диаметр ствола, НКТ	0,43	1					
v_{\max} , м/с	-0,06	0,26	1				
v_{\min} , м/с	0,33	-0,19	0,29	1			
Диаметр ствола, 1,3 м	0,44	0,94	0,10	-0,23	1		
v_{\max} , м/с	-0,19	-0,25	0,13	-0,04	-0,37	1	
v_{\min} , м/с	-0,07	-0,46	0,35	0,74	-0,57	0,066	1

Значения данных характеристик в табл. 3 составляют менее 1 (от -0,19 до -0,06), что говорит об отсутствии взаимосвязи между возрастом исследуемых

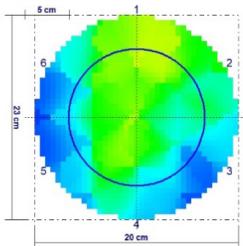
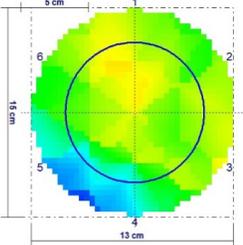
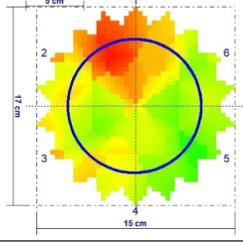
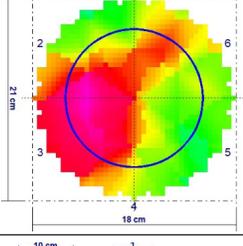
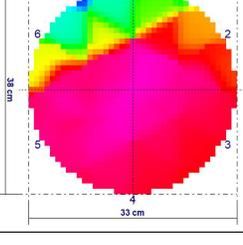
таксонов и скоростью прохождения импульса на изучаемых участках ствола или слабой взаимосвязи, носящей случайный характер (от 0,33 до 0,44).

Большинство экземпляров клена остролистного (87,5 %) в возрасте 30 лет уже имеют начальные стадии внутренних разрушений древесины.

На основе томограмм срезов поперечного сечения ствола разработана шкала поврежденности древесины гнилью (табл. 4).

Таблица 4

Шкала поврежденности древесины на основе импульсной томографии кленов
The scale of wood damage based on impulse tomography of the maples

Стадия	Характеристика	Пример томограммы
1 – здоровые	Естественная или пониженная плотность древесины, на томограмме присутствуют только синий, голубой и зеленый цвета	
2 – начальное поражение	Патологическое снижение плотности древесины, начало разрушения межволоконных связей, на томограмме преобладают зеленый и желтый цвета, повреждения охватывают до 30 % площади	
3 – ослабленные	Развитие некротических полостей, на томограмме появляются включения оранжевого и красного цветов, охватывающие до 20 % площади	
4 – сильно ослабленные	Наличие пустот, на томограмме появляются включения фиолетового цвета, занимающие до 30 % площади	
5 – критическое поражение	Наличие пустот, фиолетовый цвет на томограмме преобладает и распространяется на более чем 30 % площади	

Согласно разработанной шкале к 1-й стадии относятся экземпляры, на томограмме которых присутствует только синий, зеленый и голубой цвета, независимо от их процентного соотношения. К последующим стадиям относятся экземпляры, на томограмме которых появляются желтый, красный, оранжевый и фиолетовый цвета в различном процентном соотношении.

Основываясь на результатах оценки, полученных с помощью шкалы поврежденности древесины, установлено, что значительная доля исследуемых экземпляров клена остролистного (63 %) и клена Шведлера (90 %) характеризуется начальной степенью поражения древесины ствола. У 27 % обследованных деревьев клена остролистного выявлена деструкция древесины (3-я стадия). Оставшиеся 10 % кленов остролистных имеют критическое поражение древесины и 10 % экземпляров клена Шведлера относятся к 3-й стадии поврежденности древесины.

Выводы

1. Декоративная разновидность клена остролистного *Acer platanoides var. schwedleri* К.Коч (Европа) показала себя более устойчивой в северных условиях (г. Архангельск). Древесина экземпляров данного таксона в 77-летнем возрасте в 90 % случаев находится в ослабленном, и в 10 % – в сильно ослабленном состоянии, что соответствует 2-й и 3-й стадиям шкалы поврежденности древесины. Большинство экземпляров исследованного рода в возрасте 30 лет имеют признаки разрушений внутренней части ствола. Такие деревья требуют соответствующей обработки пораженных участков.

2. Исследуемые таксоны можно продолжать использовать в городском озеленении с применением необходимых агротехнических мероприятий – своевременная санитарная обрезка, зачистка и обработка механических повреждений.

3. При обнаружении признаков гнили у основания ствола рекомендуется провести резистографию для уточнения степени поражения. В случае обнаружения критических повреждений, представляющих опасность, необходимо рассмотреть возможность удаления дерева.

4. Корреляция между возрастом кленов и степенью деструкции древесины отсутствует.

5. Результаты исследования подчеркивают необходимость комплексного подхода (визуального и инструментального) к оценке состояния городских насаждений и своевременного проведения мероприятий по их поддержанию. Инструментальная диагностика деревьев с помощью прибора «Арботом» позволяет дать актуальные рекомендации по сохранению городских зеленых насаждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в Северо-Восточную часть Русской равнины (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 73–85.

Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Gaevskiy N.P. Stepwise Introduction of Dendroflora Species to the Northeastern Part of the Russian Plain (Review). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-73-85>

2. Вакин А.Т. Сердцевинная гниль ели в дачах Ржевского лесничества Тверской губернии // Изв. Ленинградск. лесн. ин-та. 1927. Вып. XXXV. С. 105–154.
- Vakin A.T. Heart Rot of Spruce in the Dachas of the Rzhev Forestry of the Tver Province. *Izvestiya Leningradskogo lesnogo instituta*, 1927, iss. XXXV, pp. 105–154. (In Russ.).
3. Ванин С.И. Гниль дерева. Ее причины и меры борьбы. М.: Новая деревня, 1928. 112 с.
- Vanin S.I. *Wood Rot. Its Causes and Control Measures*. Moscow, Novaya derevnya Publ., 1928. 112 p. (In Russ.).
4. Журавлев И.И. Диагностика болезней леса. М.: Сельхозиздат, 1962. 192 с.
- Zhuravlev I.I. *Diagnostics of Forest Diseases*. Moscow, Sel'khozizdat Publ., 1962. 192 p. (In Russ.).
5. Захарова М.Е., Волкова О.А. Анализ антропогенных воздействий на состояние зеленых насаждений города Могилева и окрестностей // Молодой ученый. 2018. Т. 16, № 202. С. 81–83.
- Zakharova M.E., Volkova O.A. Analysis of Anthropogenic Impacts on the State of Green Spaces in the City of Mogilev and its Environs. *Molodoj uchenyj* = Young Scientist, 2018, vol. 16, no. 202, pp. 81–83. (In Russ.).
6. Зальвская О.С., Бабич Н.А. Импульсно-томографная диагностика состояния древесных пород в городских условиях // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. 41, № 1. С. 33–37.
- Zalyvskaya O.S., Babich N.A. Pulse-Tomograph Diagnostics of the State of Tree Species in Urban Environments. *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2023, vol. 41, no. 1, pp. 33–37. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-1-33-37>
7. Колесников В.П., Любарский Л.В. Дереворазрушающие грибы восточных склонов среднего Сихотэ-Алиня // Тр. Сихотэ-Алинского гос. заповедн. Владивосток, 1963. Вып. 3. С. 59–70.
- Kolesnikov V.P., Lyubarskij L.V. Wood-Destroying Fungi of the Eastern Slopes of the Middle Sikhote-Alin. *Trudy Sikhote-Alinskogo gosudarstvennogo zapovednika*. Vladivostok, 1963, iss. 3, pp. 59–70. (In Russ.).
8. Мелехов И.С. Лесоводство. Вып. 1. Введение в лесоводство. Архангельск: АЛТИ, 1939. 36 с.
- Melekhov I.S. *Forestry. Iss. 1. Introduction to Forestry*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Forestry Engineering Institute Publ., 1939. 36 p. (In Russ.).
9. Мельничук И.А., Йассин М.Й.С., Черданцева О.А. Диагностика внутреннего состояния деревьев *Tilia cordata* Mill. с использованием комплекса аппаратуры акустической ультразвуковой томографии «Арботом» // Вестн. РУДН. Сер.: Агрономия и животноводство. 2012. № 5. С. 25–32.
- Melnichuk I.A., Iassin S., Tcherdantzeva O.A. Diagnostics of the Internal State of the *Tilia cordata* Trees Using Complex Acoustic Ultrasonic Imaging “Arbotom”. *Vestnik RUDN. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* = RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries, 2012, no. 5, pp. 25–32. (In Russ.).
10. Попкова И.А. Интродукция видов рода *Acer* L. в дендрологическом саду им. И.М. Стратоновича: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск. 2022. 20 с.
- Popkova I.A. *Introduction of Species of the Genus Acer L. in the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2022. 20 p. (In Russ.).
11. Роготнева А.М. Инструментальная диагностика древесных насаждений Ленинского района г. Перми // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 238–240.
- Rogotneva A.M. Instrumental Diagnostics of Green Plants of Leninsky District of Perm. *Antropogennaya transformatsiya prirodnoj sredy* = Anthropogenic transformation of Nature, 2018, no. 4, pp. 238–240. (In Russ.).

12. Румянцев Д.Е., Фролова В.А. Проблемы диагностики аварийности деревьев в урбанизированной среде // Принципы экологии. 2021. Т. 10, № 2. С. 102–119.
Rumyantsev D.E., Frolova V.A. The Problem of Diagnosing the Accident Rate of Trees in an Urban Environment. *Printsipy ekologii* = Principles of the Ecology, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 102–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j1.art.2021.11162>
13. Тюкавина О.Н. Скорость прохождения звукового импульса в древесине сосны // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2014. № 2. С. 78–85.
Tyukavina O.N. Speed of Sound Impulse Propagation in Pine Wood. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* = Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural Sciences, 2014, no. 2, pp. 78–85. (In Russ.).
14. Тюкавина О.Н. О методах интерпретации результатов акустической томографии древесины сосны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 4. С. 61–67.
Tyukavina O.N. About Interpretation Methods of Acoustic Tomography Results of Pine Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2015, no. 4, pp. 61–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.4.61>
15. Тюкавина О.Н., Клецов Д.Н., Дроздов И.И., Мелехов В.И. Плотность древесины сосны обыкновенной в различных условиях произрастания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 56–64.
Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Drozdov I.I., Melekhov V.I. Wood Density of Scots Pine in Different Growth Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 6, pp. 56–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.56>
16. Bieker D., Kehr R., Weber G., Rust S. Non-Destructive Monitoring of Early Stages of White Rot by *Trametes versicolor* in *Fraxinus excelsior*. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, art. no. 210. <https://doi.org/10.1051/forest/2009103>
17. Duan M., House J., Chang S.X. Understory Plant Communities Vary with Tree Productivity in Two Reclaimed Boreal Upland Forest Types in Canada. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 453, art. no. 117577. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117577>
18. Haas J.C., Street N.R., Sjödin A., Lee N.M., Högberg M.N., Näsholm T., Hurry V. Microbial Community Response to Growing Season and Plant Nutrient Optimisation in a Boreal Norway Spruce Forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 125, pp. 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.07.005>
19. Kersten W., Schwarze F.W.M.R. Development of Decay in the Sapwood of Trees Wounded by the Use of Decay-Detecting Techniques. *Arboricultural Journal*, 2005, vol. 28, iss. 3, pp. 151–164.
20. Kolk A., Sierota Z.Z. Badań nad Wplywem Zywicowania na Stan Zdrowotny Drzew. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, 1979, no. 542–548, pp. 177–187. (In Pol.).
21. Rinn F. Technische Grundlagen der Impuls-Tomographie. *Baumzeitung*, 2003, no. 8, pp. 29–31. (In Germ.).
22. Yang X.a, Luo J. Study on Stress Wave Non-Destructive Testing of Bending Resistance Characteristics of Logs. *World Automation Congress Proceedings*, 2012, no. 6321170, pp. 496–502.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 614.841.123.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-55-67

Моделирование развития лесных пожаров с учетом пятнистых возгораний

Е.С. Андреева[✉], *д-р геогр. наук, доц.*; *ResearcherID: [ACG-6543-2022](https://orcid.org/0000-0001-7087-1870)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7087-1870>

И.В. Богданова, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [HLG-6288-2023](https://orcid.org/0000-0002-7726-7374)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7726-7374>

Г.А. Сергеева, *канд. геогр. наук*; *ResearcherID: [JUJ-2392-2023](https://orcid.org/0009-0007-2497-4829)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2497-4829>

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону, Россия, 344000; meteo0717@yandex.ru[✉], ibogdanova@donstu.ru, gsergeeva@donstu.ru

Поступила в редакцию 21.04.24 / Одобрена после рецензирования 16.07.24 / Принята к печати 19.07.24

Аннотация. Лесные пожары ежегодно уничтожают миллионы гектаров леса, нанося урон экосистемам, воздействуя на состояние приземного и пограничного слоев воздуха, обуславливая тем самым существенные экологические риски. Так, лесные пожары 2023 г., охватив площадь 28,6 млн га, стали причиной гибели почти 0,71 % лесных массивов поверхности Земли. В связи с чем прогнозирование параметров развития интенсивных лесных пожаров является актуальной задачей. Современные математические модели, описывающие течение лесных пожаров, не учитывают роль конвективного фактора. Отсутствие возможности принимать во внимание тепловую конвекцию может приводить к существенному искажению моделируемых параметров процесса, препятствуя эффективной защите населения и объектов экономики от огня. Цель исследования – обсуждение возможностей уточнения уравнений математических моделей развития лесных пожаров для разработки мер по снижению социально-экономических рисков для населения. Использованы работы П.М. Матвеева, Н.П. Курбатского, С.В. Пузача, Д.Л. Лайхтмана, А.С. Гаврилова. В числе примененных авторами методов: литературные, аналитико-статистические, аналитико-графические, методы математического моделирования. Обосновано введение параметра турбулентности в уравнение прогностической модели. Показана необходимость дополнения 1-слойной модели уравнениями 2-го слоя, характеризующими развитие пожара в нестационарном приземном слое. Доказана статистическая сходимость результатов расчетов модели, содержащей уточнение по сравнению с классическим уравнением модели Р. Ротермела. Полученные уточненные уравнения модели позволят эффективно рассчитывать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров в пределах лесных экосистем. Введение коэффициента турбулентности в прогностическое уравнение дало возможность выявить наибольшие отклонения в вычисленных высотах эллипса – предполагаемой формы распространения огня. Уточненное уравнение модели позволит существенно скорректировать размеры данного отрезка эллипса на основе учета развивающихся вертикальных конвективных потоков, способствующих трансформации низового лесного пожара в интенсивный верховой. Дальнейший научный поиск в этом направлении поможет разрабатывать действенные меры по снижению социально-экономических рисков, связанных с лесными пожарами.

Ключевые слова: пятнистые пожары, мониторинг пожароопасности, математическое моделирование, прогнозирование лесных пожаров, социально-экономические риски, экологические риски, конвекция, конвективная турбулентность

Благодарности: Авторы выражают благодарность коллегам из РГГМУ, и особую благодарность проф., д-ру физ.-мат. наук А.С. Гаврилову.

Для цитирования: Андреева Е.С., Богданова И.В., Сергеева Г.А. Моделирование развития лесных пожаров с учетом пятнистых возгораний // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 55–67. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-55-67>

Original article

Modeling Forest Fire Development Taking into Account Spot Fires

Elena S. Andreeva[✉], Doctor of Geography, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ACG-6543-2022](https://orcid.org/0000-0001-7087-1870),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7087-1870>

Irina V. Bogdanova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [HLG-6288-2023](https://orcid.org/0000-0002-7726-7374),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7726-7374>

Galina A. Sergeeva, Candidate of Geography; ResearcherID: [JUJ-2392-2023](https://orcid.org/0009-0007-2497-4829),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2497-4829>

Don State Technical University, pl. Gagarina, 1, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation;
meteo0717@yandex.ru[✉], ibogdanova@donstu.ru, gsergeeva@donstu.ru

Received on April 21, 2024 / Approved after reviewing on July 16, 2024 / Accepted on July 19, 2024

Abstract. Forest fires annually destroy millions of hectares of forest, damaging ecosystems and affecting the state of the surface and boundary layers of the air, thereby causing significant environmental risks. Thus, the forest fires of 2023, covering an area of 28.6 mln ha, caused the death of almost 0.71 % of the forests on the Earth's surface. In this regard, forecasting the parameters of the development of intense forest fires is an urgent task. Modern mathematical models describing the development of forest fires do not take into account the role of the convective factor. The inability to take thermal convection into account can lead to a significant distortion of the modeled parameters of the process, preventing effective protection of the population and economic facilities from fire. The aim of the study has been to discuss the possibilities of refining the equations of mathematical models of forest fire development in order to develop measures to reduce socio-economic risks for the population. The works of P.M. Matveev, N.P. Kurbatskij, S.V. Puzach, D.L. Lajkhtman and A.S. Gavrillov have been used. The methods used by the authors include literary, analytical-statistical, analytical-graphical, and mathematical modeling methods. The introduction of the turbulence parameter into the equation of the predictive model has been justified. The necessity of supplementing the 1-layer model with the equations of the 2nd layer characterizing the development of a fire in an unsteady surface layer has been shown. The statistical convergence of the calculation results of the model containing the refinement has been proven in comparison with the classical equation of the R. Rothermel model. The obtained refined model equations will make it possible to effectively calculate the parameters of spot and intense crown fires within forest ecosystems. The introduction of the turbulence coefficient into the predictive equation has made it possible to identify the largest deviations in the calculated heights of the ellipse and the expected shape of fire propagation. The refined model equation will make it possible to significantly adjust the dimensions of this segment of the ellipse based on the consideration of

developing vertical convective flows that contribute to the transformation of a ground forest fire into an intense crown one. Further scientific research in this area will help develop effective measures to reduce the socio-economic risks associated with forest fires.

Keywords: spot fires, fire hazard monitoring, mathematical modeling, forest fire forecasting, socio-economic risks, environmental risks, convection, convective turbulence

Acknowledgements: The authors express their gratitude to their colleagues from the Russian State Hydrometeorological University, and special thanks to Professor, Doctor of Physics and Mathematics, A.S. Gavrilov.

For citation: Andreeva E.S., Bogdanova I.V., Sergeeva G.A. Modeling Forest Fire Development Taking into Account Spot Fires. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 55–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-55-67>

Введение

Лесными пожарами с начала XXI в. в мире уничтожена существенная площадь лесных экосистем. По данным ООН количество интенсивных лесных пожаров к концу XXI в. возрастет на 50 %. Так, например, в результате лесных пожаров 2003 г. в Российской Федерации, в Сибири, было уничтожено около 22 млн га лесных экосистем; в 2004 г. в США, на Аляске, пострадало 2,6 млн га леса; в 2010 г. в Боливии погибло 1,5 млн га лесных экосистем; в Канаде в 2011 г. – 0,7 млн га, а в 2014 г. – уже 3,4 млн га. Наконец, одни из самых крупных лесных пожаров, уничтоживших более 16,8 млн га леса, наблюдались в 2020 г. в Австралии. При этом экономический ущерб от данных катастрофических явлений превысил сумму в 3,5 млрд долларов США. Отсюда вытекает проблема адекватной оценки параметров лесных пожаров на основе моделирования, следовательно, разработка мер по снижению социально-экономических и экологических рисков является здесь приоритетной как в теоретическом, так и в практическом отношении.

Математические модели, предназначенные для прогноза природных пожаров в лесных массивах, имеют свою специфику, что связано не только с особенностями горящей лесной экосистемы, но и с комплексом метеорологических условий местности [1–4]. Важным при построении модельных уравнений является учет пространственно-временного фактора, поскольку возникновение и развитие горения происходит на определенной площади за конкретное время [5–8]. Отдельной проблемой при этом становится расчет возможной длительности пожаров, поскольку последняя зависит от комплекса факторов, зачастую трудноопределяемых [9].

Внесение уточнений и подбор параметров для эффективного прогноза пожаров в лесных экосистемах возможно в случае полуэмпирических моделей. Последние, базируясь на основе законов сохранения массы, энергии и количества движения, предполагают запись модельных уравнений в упрощенном виде, а соответствующие коэффициенты или эмпирические параметры могут быть получены в результате многочисленных наблюдений или экспериментов [10]. Подобные модели широко распространились в середине XX в. и использовались в основном для прогноза динамики низовых пожаров. Обычно в описываемых моделях учитывались параметры горючести лесного материала, включая исходное жизненное состояние древостоя; метеорологические условия, из всей совокупности которых главным образом оценивалась скорость ветра; а

также рельеф местности. В то же время определяющим фактором возникновения и дальнейшего развития лесного пожара, кроме параметров, характеризующих лесные массивы, являются именно метеорологические условия местности, даже при наличии так называемого человеческого фактора, когда доказанным является искусственное происхождение возгораний. Горючесть материала лесной подстилки или уклоны местности, учитываемые, например, в модели Р. Роттермела [27], имеют вторичное значение. Кроме того, указанная модель позволяет прогнозировать параметры низовых пожаров, что снижает возможности ее применения для решения большего спектра задач.

Очевидно, что модельные расчеты и оценки пожарной опасности в настоящее время и в перспективе не утратят своей научной новизны при разработке мер по защите населения и снижению социально-экономических рисков лесных пожаров. Целью данной работы является обсуждение возможностей уточнения уравнений математических моделей лесных пожаров, включая пятнистые, для планирования на основе анализа их результатов эффективных мероприятий по снижению социально-экономических рисков для населения.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – лесные экосистемы. Работа базируется на анализе трудов о пятнистости лесных пожаров и вероятности их преобразований в интенсивные верховые П.М. Матвеева [18], Н.П. Курбатского [7, 15], С.В. Пузача [20] и др.; на результатах изучения нестационарности приземного слоя Д.Л. Лайхтмана [16], с учетом данных о строении пограничного слоя А.С. Гаврилова [8].

В числе основных использованных авторами методов – литературные, аналитико-статистические, аналитико-графические, методы математического моделирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Произведен обзор и анализ существующих проблем, возникающих при создании математических моделей для прогнозирования лесных пожаров. Ряд сложностей прогноза наиболее опасных верховых пожаров, связанный с выяснением физических характеристик перераспределения тепла и количества движения воздуха, определяющих приоритетные параметры пожара, представляется почти неустранимым. В научных работах, посвященных моделированию интенсивных верховых лесных пожаров, экспериментальных данных для разработки расчетной модели пятнистости возгораний и их дальнейшей трансформации в интенсивный верховой пожар практически нет [11–14].

Первые исследования пятнистых пожаров были проведены П.М. Матвеевым в 1975 г. [18]. Так, было установлено, что пожар становится пятнистым при интенсивности конвективных потоков, которой хватает для поднятия и переноса горящих частиц. При этом времени их горения достаточно для того, чтобы поджечь удаленные от очага возгорания объекты: лесную подстилку, надпочвенный покров, древостой и пр.

Первая модель тепломассообмена, предложенная в 1964 г. Н.П. Курбатским [15], предполагала оценку площади выгора на основе учета скорости приземного воздуха, как и большинство моделей распространения огня.

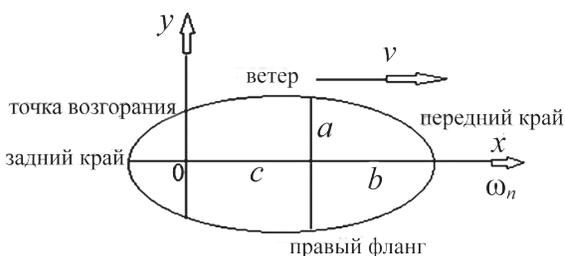
В 2018 г. С.В. Пузач и др. [20] предложили современную версию модели теплообмена для прогноза пятнистости возгораний, отметив ряд сложностей, возникающих при составлении уравнений, и не решив до конца указанную проблему.

Как отражено в исследованиях [13, 14], пятнистость свойственна любому верховому пожару при усилении ветра [17, 19]. Однако, как представляется авторам работы, с точки зрения физики приземного слоя сильный приземный поток (ветер), возможно, способствует возгоранию и дальнейшему разрастанию огня (на 1-й стадии пожара), но на 2-й стадии, когда развивается как внутренняя конвекция (тепловая неустойчивость приземного слоя воздуха, порождаемая пожаром), так и, возможно, внешняя, связанная с внутримассовыми условиями, скорость приземного потока не только утрачивает свое значение, но даже препятствует развитию низового пожара и его трансформации в пятнистый, верховой. Необходимость учета доли турбулентного притока тепла в условиях нестационарного приземного слоя с хорошо развитой тепловой турбулентностью подчеркивалась в работе [7] и было установлено, что даже при весьма незначительном тепловом потоке $q = 0,003 \text{ Вт/м}^2$ интенсивность турбулентного притока тепла в приземных условиях увеличивалась существенно, возрастая за 35 мин до $+10,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (при начальных значениях температуры $0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Отсюда очевидно, что роль конвективного фактора, в первую очередь тепловой внутренней конвекции [2, 6–10, 13–14], возникающей вследствие развития огня, нельзя не учитывать при построении математических моделей лесных пожаров, особенно пятнистых и пятнистых, трансформирующихся в верховые.

Рассмотрим возможности учета изложенных представлений в классической математической модели лесных пожаров, взяв при этом модель Р. Ротермела [27], поскольку, базируясь на эмпирическом материале, она позволяет достаточно результативно рассчитывать параметры низового лесного пожара. На рисунке показана схема контура для расчета параметров низового пожара, основанная на представлениях о возможной эллиптической форме распространения огня.

Схема контура низового пожара
в модели Р. Ротермела [27]
(v – скорость потока ветра)
The outline of the ground fire
contour in the R. Rothermel model
[27] (v – the wind flow velocity)



Для прогнозирования поведения лесного пожара в модели Р. Ротермела осуществляется вычисление параметров эллипса: a , b и c :

$$a = \frac{b}{LB}; \quad b = \frac{\omega_n}{2} + \frac{1 + HB}{HB}; \quad c = b - \frac{\omega_n}{HB};$$

$$LB = 0,936 \exp(0,2566v) + 0,461 \exp(-0,1548v) - 0,397; \quad (1)$$

$$B = \frac{LB + \sqrt{LB^2 - 1}}{LB - \sqrt{LB^2 - 1}},$$

где a – высота эллипса; b – длина эллипса (фронтальная зона огня); c – длина эллипса (выгор); LB , HB – ширина и высота отрезка эллипса b соответственно; ω_n – скорость продвижения лесного пожара, м/мин; v – скорость потока (ветра), м/с.

При этом центральной расчетной характеристикой модели является скорость продвижения лесного пожара (м/мин) [1]:

$$\omega_n = \omega_0(1 + k(U) + k(S)), \quad (2)$$

ω_0 – плотность пласта горючих веществ, кг/м³; $k(U)$ – величина частичек вегетативной прогораемой материи, м²; $k(S)$ – скорость полного прогорания вегетативного горючего, м/мин.

Несмотря на преимущества данной модели, как представляется авторам, в исходном виде она неприменима для прогнозирования пятнистых и интенсивных верховых пожаров, которые представляют собой наибольшую опасность для социума и объектов экономики [25, 26]. Кроме того, в модели Р. Ротермела практически не учитываются метеорологические параметры за исключением скорости приземного потока. В связи с этим следует уточнить основное прогностическое уравнение (1), включив в него еще ряд параметров. В частности, М.А. Софронов [21] при оценке скорости распространения низового пожара предложил учитывать не только скорость ветра, но и относительную влажность воздуха, а также уклон местности, шероховатость или вязкость поверхности.

Исходя из сказанного, как представляется авторам, для интенсивного верхового пожара, возможно, эволюционировавшего из низового, вычисления скорости распространения огня необходимо производить на 2 уровнях, используя 2-слойные модели: приповерхностном (высоты 0–1 м) и приземном (высоты 1–2 м) [7]. В этом случае формулу (2), описывающую процессы термического преобразования горючего вещества в приповерхностном слое, необходимо дополнить более точными параметрами, характеризующими количество прогораемого вещества лесных массивов (U), а также мощность формирующегося при этом теплового потока (Q):

$$\omega_n = UQ, \quad (3)$$

где ω_n – скорость продвижения лесного пожара, м/мин; U – удельный объем пласта горючих веществ, м³/кг; Q – тепловой поток прогораемой части лесного массива, включая лесную подстилку, Вт/м².

В приземном слое (2-й уровень модели) более важными являются такие параметры, как температура воздуха, вертикальные и горизонтальные составляющие скорости потока, влажность воздуха. Возможным уравнением для вычисления скорости продвижения пожара в приземном слое может служить следующее:

$$\omega_{n1} = \omega_n \cdot \left| \frac{t_0}{t_1} \right| \cdot \left| \frac{v_0}{v_g} \right| \cdot \left| \frac{f_0}{f_1} \right|,$$

где ω_{n1} – скорость продвижения огня в приземном слое, м/мин; t_0 – температура воздуха в приповерхностном слое, °С; t_1 – температура воздуха в приземном

слое на высоте 1–2 м, °С; v_0 – скорость потока воздуха в приповерхностном слое, м/с; v_g – горизонтальная составляющая скорости потока воздуха, м/с; f_0 – относительная влажность воздуха в приповерхностном слое воздуха, %; f_1 – относительная влажность воздуха в приземном слое на высоте 1–2 м.

Модельные уравнения Р. Ротермела для прогноза дальнейшего распространения низового пожара позволяют рассчитывать 3 характеристики возможного эллипса: a , b , c . Данное представление возможного развития пожара в виде эллиптической фигуры представляется достоверным. Однако недоучет вертикальной составляющей параметра эллипса a в случае низового пожара не влечет никаких последующих ошибок. При пятнистом и интенсивном верховых пожарах, когда происходит развитие как внутренней термической, так и внешней механической конвекции и последующей турбулентности, позволяющей «забрасывать» горящие частицы вверх и в стороны от очага, возможны существенные изменения не только параметра a , но и параметров b и c . Поэтому для учета турбулентности приземных слоев воздуха (в приповерхностном слое 0–1 м учитывать турбулентность бессмысленно, т. к. она будет «гаситься» поверхностным слоем лесной подстилки или почвы) будем руководствоваться известными теоретическими представлениями о нестационарности и физических закономерностях приземного слоя воздуха. Так, Д.Л. Лайхтманом [16] обоснована модель нестационарного приземного слоя, включая систему уравнений движения без учета силы Кориолиса; притока тепла Θ ; баланса энергии турбулентности b . Система замыкалась с помощью гипотезы Монина–Обухова и обобщенной формулы Кармана:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{d}{dz} k \frac{du}{dz}; \\ \frac{d\Theta}{dt} &= -\frac{d}{dz} k \frac{d\Theta}{dz}; \\ \frac{db}{dt} &= k \left(\frac{du}{dt} \right)^2 - k \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} - \frac{cb^2}{k} + \alpha_b \frac{d}{dz} k \frac{db}{dz}; \\ k &= l\sqrt{b}; \\ l &= -2\kappa C \frac{1}{4} + \frac{\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz}}{\frac{d}{dz} \left[\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} \right]}, \end{aligned} \quad (4)$$

где u – скорость движения частиц воздуха, м/с; t – температура воздуха, °С; z – высота, м; Θ – приток тепла, Дж/с·м²·кг; b – энергия турбулентности, Дж/кг; k – коэффициент турбулентности, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; l – масштаб турбулентности, м; C – постоянная [16], $\sim 0,046$; κ – постоянная Кармана, вычислена для решения данной задачи, $\sim 0,397$; α_b – постоянная [16], $0,73$.

Исходя из представлений о физических закономерностях нестационарного приземного слоя воздуха, изложенных в трудах Д.Л. Лайхтмана [16], можно сделать вывод о важности турбулентных движений в распределении тепла, энергии, частиц воздуха. В связи с чем для непосредственного решения описываемой задачи рассмотрим диффузию вещества и энергии, возникающую вследствие нагревания и трансформации поверхностного слоя почвы при пожарах [6–10, 22–24], моделирование которых основывается на теории градиентного переноса. Последняя характеризуется коэффициентом турбулентной диффузии k при моделировании турбулентности в приземном слое. В данных обстоятельствах для учета вертикальных потоков вещества и тепловой энергии, возникающих при интенсивном пятнистом пожаре, будем оценивать диффузионный перенос только в вертикальной плоскости k_z . При этом, как представляется, искажений в расчетах не будет, т. к. горизонтальные составляющие коэффициента турбулентности будут пренебрежимо малы из-за шероховатости поверхности и действия силы трения между частицами вещества. Для упрощения модельного уравнения воспользуемся уравнением М.И. Будыко [5], рассчитывающим коэффициент вертикальной диффузии на единичном уровне:

$$k_z = k_1 p \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \overline{Ri}}, \quad (5)$$

где k_z – коэффициент вертикальной диффузии, м/с; $k_1 p$ – k_z на единичной высоте z_1 и в равновесных условиях, на высоте 1 м составляет 0,1–0,2 м/с; \overline{Ri} – среднее по пограничному слою число Ричардсона,

$$\overline{Ri} = \frac{g \frac{dT}{dz}}{T_a \left(\frac{dT}{dz} \right)^2},$$

T_a – температура по абсолютной шкале, К.

В связи с изложенными соображениями внесем некоторые дополнения в исходную формулу (1) модели Р. Ротермела для уточнения развития пожара от низового к интенсивному верховому (2-й слой модели), рассчитывая скорость продвижения огня ω_{n1} в приземном слое по формуле (5) и дополнив уравнение (1) выражением для расчета коэффициента турбулентности k_z с заменой им безразмерного параметра (0,397), поскольку по смыслу последний выполняет роль параметра, снижающего размеры ширины отрезка эллипса a . Учет интенсивной конвекции и последующей турбулентности способны скорректировать параметр ширины отрезка a с большей точностью по отношению к реальным условиям. Тогда формула (1) может быть представлена следующим образом:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566v) + 0,461 \exp(-0,1548v) - kz \cdot$$

С учетом формул (4) и (5) получим итоговое выражение:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566v) + 0,461 \exp(-0,1548v) - k_1 p \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \frac{g \frac{dT}{dz}}{T_a \left(\frac{dT}{dz} \right)^2}}.$$

Апробация полученного уравнения и моделирование различных случаев с характерным развитием конвективной турбулентности позволила получить результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования параметров интенсивных пожаров с учетом и без учета турбулентности [2, 8, 16] для нестационарного приземного слоя
The results of modeling the parameters of intense fires with and without turbulence [2, 8, 16] for an unsteady surface layer

v , м/с	k_z , м/с	LB	HB	a	b	c
4,000	–	2,470	22,521	0,521	1,290	1,268
4,000	0,500	2,370	19,640	0,552	1,301	1,276
8,000	–	7,001	139,001	0,220	1,507	1,500
8,000	2,000	5,400	107,002	0,281	1,509	1,500
12,000	–	11,610	579,501	0,170	2,001	1,997
12,000	5,000	7,010	199,290	0,290	2,005	1,995

Примечание: Полужирным шрифтом обозначены наибольшие отклонения в вычисленных значениях отрезка a эллипса, полученные с помощью расчетов по уточненной формуле в сравнении с классической формулой Р. Ротермела в условиях нестационарного приземного слоя.

Адекватность найденных значений отрезка a эллипса была проверена с помощью критерия Стьюдента (двухвыборочного t -критерия). Для чего было произведено сравнение значений, вычисленных с помощью модели Р. Ротермела и с учетом предложенного авторами уравнения (табл. 2). Значение t -критерия Стьюдента оказалось меньше критического (табличного) значения: $0,609 < 2,776$, что доказывает статистическую сходимость полученных результатов расчетов модели, содержащей уточнение, и, как следствие, адекватность предложенного уточнения.

Отсюда уточненное уравнение, обоснованное для нестационарного приземного слоя (2-й слой модели), позволит существенно скорректировать размеры отрезка a эллипса на основе учета развивающихся как внутренних, так и внешних вертикальных конвективных потоков, способствующих возникновению турбулентности приземного слоя и трансформации низового лесного пожара в интенсивный верховой.

Таблица 2

Результаты сравнения уточненного варианта модели с классическим уравнением модели Р. Ротермела
The results of comparison of the refined version of the model with the classical equation of the R. Rothermel model

Уравнение	Среднее значение	Дисперсия	Степени свободы	Объединенная дисперсия	Вычисленный t -критерий	Критическое значение t -критерия при уровне достоверности 95 %
Уточненное	0,374	0,016	4	0,02	0,609	2,776
Модель Р. Ротермела	0,304	0,024	4			

Заключение

В результате уточнения полуэмпирической модели Р. Ротермела для нестационарного приземного слоя обосновано введение параметра турбулентности – соответствующего коэффициента турбулентности. Показана необходимость дополнения 1-слойной модели уравнениями 2-го слоя, характеризующими развитие пожара в нестационарном приземном слое. Полученные уточненные уравнения позволят более эффективно рассчитывать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров в пределах лесных экосистем. Дальнейшее уточнение уравнений полуэмпирических моделей лесных пожаров является перспективным, исследования в этом направлении следует продолжать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Суховольский В.Г., Овчинникова Т.М. Оценка и прогноз послепожарного состояния лиственницы Гмелина на мерзлотных почвах Средней Сибири // Лесоведение. 2004. № 2. С. 3–11.

Abaimov A.P., Prokushkin S.G., Sukhovol'skii V.G., Ovchinnikova T.M. Assessment and Forecast of Post-Fire Condition of Gmelin Larch on Permafrost Soils of Central Siberia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2004, no. 2, pp. 3–11. (In Russ.).

2. Андреева Е.С., Сергеева Г.А., Богданова И.В. Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности // Безопасность техногенных и природных систем. 2025. Т. 9, № 1. С. 14–21.

Andreeva E.S., Sergeeva G.A., Bogdanova I.V. Refinement of the Ground Forest Fire Model Taking into Account Convective Turbulence. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem* = Safety of Technogenic and Natural Systems, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 14–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

3. Анойкин Р.К. Анализ математических моделей, используемых для прогнозирования низовых лесных пожаров // Технологии гражданской безопасности. 2020. Т. 17, № 2(64). С. 58–60.

Anoikin R.K. Analysis of Mathematical Models Used for Forest Ground Fires Forecasting. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* = Civil Security Technology, 2020, vol. 17, no. 2(64), pp. 58–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2020.17.2.64.10.58>

4. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С.: Фундаментальн. науки. Информат. 2011. № 12. С. 51–56.

Barovik D.V., Taranchuk V.B. Algorithmic Fundamentals of Computer Model for Forest Fires Prediction. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C: Fundamental'nye nauki. Informatika* = Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences, 2011, no. 12, pp. 51–56. (In Russ.).

5. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 255 с.

Budyko M.I. *Heat Balance of the Earth's Surface*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1956. 255 p. (In Russ.).

6. Василенко С.В., Гаврилов А.С., Липовицкая И.Н., Мханна А. Метод климатологического анализа вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя с использованием численной модели // Уч. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2006. № 2. С. 53–64.

Vasilenko S.V., Gavrilov A.S., Lipovitskaya I.N., Mkhanna A. A Method of Climatological Analysis of the Vertical Structure of the Atmospheric Boundary Layer Using a Numerical

ical Model. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 2006, no. 2, pp. 53–64. (In Russ.).

7. Возникновение лесных пожаров: сб. ст. / под ред. Н.П. Курбатского. М.: Наука, 1964. 57 с.

The Occurrence of Forest Fires: Collection of Articles. Ed. by N.P. Kurbatskij. Moscow, Nauka Publ., 1964. 57 p. (In Russ.).

8. Гаврилов А.С. О строении пограничного слоя атмосферы над поверхностью с произвольными свойствами шероховатости // *Метеорол. и гидрол.* 1973. № 12. С. 35–42.

Gavrilov A.S. On the Structure of the Atmospheric Boundary Layer above the Surface with Arbitrary Roughness Properties. *Meteorologiya i gidrologiya* = Russian Meteorology and Hydrology, 1973, no. 12, pp. 35–42. (In Russ.).

9. Гаврилов А.С., Мханна А., Харченко Е.В. Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров // *Уч. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та*. 2013. № 32. С. 119–129.

Gavrilov A.S., Mhanna A., Kharchenko E.V. Verification of the Model of Atmospheric Boundary Layer Applied to the Problem Prediction of Air Pollution from Forest Fires. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 2013, no. 32, pp. 119–129. (In Russ.).

10. Гаврилов А.С., Петров Ю.С. Оценка точности определения турбулентных потоков по стандартным гидрометеорологическим измерениям над морем // *Метеорол. и гидрол.* 1981. № 4. С. 52–59.

Gavrilov A.S., Petrov Yu.S. Assessment of the Accuracy of Turbulent Flow Determination Using Standard Hydrometeorological Measurements over the Sea. *Meteorologiya i gidrologiya* = Russian Meteorology and Hydrology, 1981, no. 4, pp. 52–59. (In Russ.).

11. Гришин А.М., Пугачева П.В. Анализ действия лесных и степных пожаров на города и поселки и новая детерминированно-вероятностная модель прогноза пожарной опасности в населенных пунктах // *Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика*. 2009. № 3(7). С. 99–108.

Grishin A.M., Pugacheva P.V. Analysis of Impact of Forest and Steppe Fires on Cities and Villages and the New Determinate and Probability Model for Prediction of Fire Dangerous in Villages and Cities. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2009, no. 3(7), pp. 99–108. (In Russ.).

12. Карлин Л.Н., Ванкевич Р.Е., Тумановская С.М., Андреева Е.С., Ефимова Ю.В., Хаймина О.В., Клеванный К.А., Фрумин Г.Т., Еремина Т.Р., Ершова А.А. Гидрометеорологические риски. СПб.: Рос. гос. гидрометеорол. ун-т, 2008. 282 с.

Karlin L.N., Vankevich R.E., Tumanovskaya S.M., Andreeva E.S., Efimova Yu.V., Khajmina O.V., Klevannyj K.A., Frumin G.T., Eremina T.R., Ershova A.A. *Hydrometeorological Risks*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University Publ., 2008. 282 p. (In Russ.).

13. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // *Математическое моделирование*. 2009. Т. 1, № 5. С. 629–634.

Kuleshov A.A., Myshetskaya E.E. Mathematical Simulation of Forest Fires Using Multiprocessor Computers. *Matematicheskoe modelirovanie* = Mathematical Models and Computer Simulations, 2009, vol. 1, pp. 629–634. <https://doi.org/10.1134/S2070048209050093>

14. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Якуш С.Е. Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной двумерной модели // *Математическое моделирование*. 2016. Т. 28, № 12. С. 20–32.

Kuleshov A.A., Myshetskaya E.E., Yakush S.E. Numerical Simulation of Forest Fire Propagation Based on Modified Two-Dimensional Model. *Matematicheskoe mod-*

elirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations, 2017, vol. 9, pp. 437–447. <https://doi.org/10.1134/S207004821704007X>

15. Курбатский Н.П. Пожарная опасность в лесу и ее измерение по местным шкалам // Лесн. пожары и борьба с ними: сб. ст. / под ред. Н.П. Курбатского. М.: АН СССР, 1963. С. 5–30.

Kurbatskij N.P. Fire Danger in the Forest and its Measurement on Local Scales. *Lesnye pozhary i bor'ba s nimi*: Collection of Articles. Ed. by N.P. Kurbatskij. Moscow, the USSR Academy of Sciences Publ., 1963, pp. 5–30. (In Russ.).

16. Лайхтман Д.Л., Шеметова Г.В. Нестационарный приземный слой. Резкое изменение турбулентного потока тепла // Некоторые вопросы физики атмосферы. Тр. Ленингр. Гидрометеорол. ин-та. 1974. Вып. 49. С. 12–18.

Lajkhtman D.L., Shemetova G.V. Unsteady Surface Layer. Abrupt Change in Turbulent Heat Flux. *Nekotorye voprosy fiziki atmosfery. Trudy Leningradskogo Gidrometeorologicheskogo instituta*, 1974, iss. 49, pp. 12–18. (In Russ.).

17. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной защиты огнезащиты на строительном объекте // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 3. С. 61–68.

Martynov A.V., Grekov V.V., Popova O.V. Measuring Tool Kit for Express Analysis of Intumescent Fire Protection at a Construction Facility. *Pozhary i chrezvychajnye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination, 2021, no. 3, pp. 61–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>

18. Матвеев П.М. Вероятность пятнистых загораний при лесных пожарах // Вопросы лесной пирологии: сб. ст. / под ред. Н.П. Курбатского. Красноярск: Ин-т леса и древесины, 1975. С. 44–65.

Matveev P.M. The Probability of Spot Fires during Forest Fires. *Voprosy lesnoj pirologii*: Collection of Articles. Ed. by N.P. Kurbatski. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood Publ., 1975, pp. 44–65. (In Russ.).

19. Меднов А.О., Попова Е.С. Обеспечение пожарной безопасности на основе изучения особенностей развития пожаров и учета применяемых легковоспламеняющихся жидкостей // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. 2017. № 3. С. 82–84.

Mednov A.O., Popova E.S. Ensuring Fire Safety Based on Studying the Characteristics of Fire Development and Taking into Account the Flammable Liquids Used. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobscheniya*, 2017, no. 3, pp. 82–84. (In Russ.).

20. Пузач С.В., Ле Т.А., Нгуен Т.Х. Пожарная опасность пятнистого возгорания при верховом лесном пожаре для объектов энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 2. С. 64–70.

Puzach S.V., Le T.A., Nguyen T.H. Fire Hazard from Spotting Ignition at Crown Fires for Power Engineering Facilities. *Pozhary i chrezvychajnye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination, 2018, no. 2, pp. 64–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2018.2.64-70>

21. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука, 1990. 204 с.

Sofronov M.A., Volokitina A.V. *Pyrological Zoning in the Taiga Zone*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 204 p. (In Russ.).

22. Abannikov V.N., Seroukhova O.S., Mkhanna A.I.N., Podgaiskii E.V. Assessing the Impact of Agrometeorological Conditions on the Yield of Grain and Leguminous Crops in European Russia. *IOP conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1010, art. no. 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012033>

23. Adamyan V.L., Sergeeva G.A., Seferyan L.A., Gorlova N.Yu. Development of Technological Measures to Ensure the Safety of Production Facilities in Petrochemical Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1083, art. no. 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012050>

24. Andreeva E.S. The Possibilities of Using the Minimax Method to Diagnose the State of the Atmosphere. *Journal of Atmospheric Science Research*, 2023, vol. 6, iss. 2, pp. 42–49. <https://doi.org/10.30564/jasr.v6i2.5519>

25. Bogdanova I., Дымникова О., Loskutnikova I. Analysis of the Noise Load from the Manufacturing Enterprise on the Territory of Residential Buildings Based on Complex Mathematical Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 1001, art. no. 012119. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012119>

26. Denisov O., Andreeva E. An Innovative Approach to the Elimination of Combustion Foci at MSW Landfills (on the Example of the Rostov Region). *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 273, art. no. 04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127304006>

27. Rothermel R.C. *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Ogden, Utah, U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972, Research Paper INT-115. 40 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 628.92:69:614.843.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-68-80

Применение модульных иглофильтров для аккумуляции грунтовых вод при тушении лесных пожаров

*А.С. Лоренц*¹, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [HDM-5909-2022](https://orcid.org/0000-0002-0906-8779),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0906-8779>

*О.И. Григорьева*², канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

*И.В. Григорьев*³, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; a.lorents@narfu.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; grigoreva_o@list.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru

Поступила в редакцию 11.03.24 / Одобрена после рецензирования 03.06.24 / Принята к печати 05.06.24

Аннотация. Исследование направлено на разработку инновационных конструкций иглофильтров, которые могут быть использованы для борьбы с лесными пожарами в составе мобильных установок для получения грунтовых вод непосредственно у мест проведения противопожарных мероприятий. Иглофильтры являются эффективными средствами понижения уровня грунтовых вод, что способствует тушению и предотвращению распространения пожара. Подробно описывается новое конструктивное решение модульного иглофильтрационного звена установки водопонижения, разработанного с учетом особенностей и требований работы в условиях участков лесного фонда. Основными ключевыми характеристиками решения являются высокий уровень фильтрации; модульная конструкция, позволяющая быстро и гибко адаптировать иглофильтр к различным пожарным ситуациям; высокая мобильность, обеспечивающая возможность быстрого развертывания и перемещения иглофильтров на лесопожарных участках. Также представлены новые материалы и технологии, применяемые при производстве иглофильтров, нацеленные на повышение их эффективности и экологической безопасности. Подчеркивается важность использования новых конструкций модульных иглофильтров в лесопожарной деятельности, обсуждаются возможности их дальнейшего усовершенствования для развития методов борьбы с лесными пожарами и защиты лесных ресурсов. Примерами здесь могут служить применение более эффективных материалов для фильтрации, увеличение мощности системы вакуумного всасывания, изменение конструкции для повышения мобильности иглофильтров и разработка транспортно-технологических средств для их оперативного перемещения.

Ключевые слова: модульный иглофильтр, вакуумное водопонижение, лесной пожар

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Часть материалов исследования получена за счет гранта РФФИ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.



Для цитирования: Лоренц А.С., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Применение модульных иглофильтров для аккумуляции грунтовых вод при тушении лесных пожаров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 68–80. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-68-80>

Original article

Application of Modular Wellpoints for Groundwater Accumulation during Forest Fire Extinguishing

Anatolii S. Lorents^{1✉}, Candidate of Engineering; ResearcherID: [HDM-5909-2022](https://orcid.org/0000-0002-0906-8779),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0906-8779>

*Olga I. Grigoreva*², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

*Igor V. Grigorev*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; a.lorents@narfu.ru✉

²Saint-Petersburg State Forest Technical University, per. Institutskiy, 5, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; grigoreva_o@list.ru

³Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru

Received on March 11, 2024 / Approved after reviewing on June 3, 2024 / Accepted on June 5, 2024

Abstract. The research has been aimed at developing innovative wellpoint designs that can be used to fight forest fires as part of mobile installations for obtaining groundwater directly at the sights of fire-fighting activities. Wellpoints are effective means of lowering the groundwater level, which helps to extinguish and prevent the spread of fire. A new design solution for a modular wellpoint unit for a dewatering system developed taking into account the specific features and requirements of work in forest areas, has been described in detail. The key characteristics of the solution are a high filtration level, a modular design that allows for quick and flexible adaptation of the wellpoint to various fire situations and high mobility which ensures the ability to quickly deploy and move wellpoints in forest fire areas. New materials and technologies used in the production of wellpoints aimed at improving their efficiency and environmental safety have also been presented. The importance of using new designs of modular wellpoints in forest fire prevention activities has been emphasized, and the possibilities of their further improvement for the development of methods for fighting forest fires and protecting forest resources have been discussed. Examples here include the use of more efficient filtration materials, increasing the capacity of the vacuum suction system, changing the design to increase the mobility of wellpoints, and developing transport and technological means for their rapid movement.

Keywords: modular wellpoint, vacuum dewatering, forest fire

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative Developments in the Field of Logging Industry and Forestry”. Some of the research materials were obtained through the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Lorents A.S., Grigoreva O.I., Grigorev I.V. Application of Modular Wellpoints for Groundwater Accumulation during Forest Fire Extinguishing. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 68–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-68-80>

Введение

Лесные пожары являются источником серьезных разрушений и представляют угрозу для экосистем, животных, растительности и населения. Каждый год по всему миру горят тысячи гектаров лесных площадей, что приносит значительный экологический, экономический и социальный ущерб [7, 10, 18–20]. Борьба с лесными пожарами – сложная и опасная задача, требующая применения различных методов и ресурсов.

В данной статье рассмотрено использование модульных иглофильтров в составе вакуумных установок водопонижения как новый метод и его потенциальное применение в борьбе с лесными пожарами. Необходимость разработки новых методов водопонижения в данной сфере обусловлена несколькими факторами, такими как распространение лесных пожаров, ограничения классических методов, экологическая безопасность, эффективность.

Лесные пожары способны быстро распространяться и охватывать большие территории. Используемые методы борьбы с ними несовершенны, что связано с недостаточностью количества водоемов, необходимостью получать воду из удаленных и труднодоступных районов, а также с высокой стоимостью эксплуатации самолетов и вертолетов [11, 16]. Сброс химических веществ или применение больших объемов воды могут негативно влиять на окружающую среду. Кроме того, классические методы зачастую оказываются ограничены погодными условиями, например, сильным ветром или низкой видимостью. Соответственно, существующие методы бывают недостаточно эффективны для быстрой остановки фронта огня. Необходимо разрабатывать новые методы для более эффективного контроля и тушения пожаров, гибкие и приспособленные к различным условиям, экологически безопасные и имеющие минимальное негативное воздействие на экосистему леса.

В свете этих факторов разработка новых методов использования вакуумных установок водопонижения становится крайне важной для повышения эффективности и безопасности борьбы с лесными пожарами, сохранения природной среды [4, 5, 8, 9].

Целью данного исследования является анализ особенностей разработки и теоретических расчетов новых конструкций модульных иглофильтров для предотвращения распространения лесных пожаров и защиты лесных экосистем.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали новые конструкции модульных иглофильтров, которые разрабатываются для использования в лесопожарной деятельности. Методология включала литературный обзор, теоретическое моделирование, сравнительный анализ, а также оценку практической применимости. Комбинация указанных методов позволяет провести всеобъемлющее изучение новых конструкций модульных иглофильтров в лесопожарной деятельности и получить релевантные и достоверные результаты, которые могут быть использованы для разработки новых технологий и обеспечения безопасности в борьбе с лесными пожарами.

Основные преимущества иглофильтра по сравнению с классическими методами водопонижения:

1. Экологическая безопасность. Иглофильтр не требует использования химических веществ или больших объемов воды, что позволяет избежать возможного негативного влияния на окружающую среду.

2. Гибкость и мобильность. Иглофильтры могут быть установлены и использованы в различных условиях и на различных территориях, эффективны как на открытом ландшафте, так и в гористых и лесистых районах, где доступность воды ограничена.

3. Эффективность. Иглофильтры способны быстро и надежно получать грунтовую воду в условиях отсутствия открытых водоёмов, что помогает останавливать пожар и предотвращать его возобновление.

4. Снижение стоимости и количества необходимых ресурсов. Использование самолетов или вертолетов для сброса воды требует значительных расходов и ресурсов. Иглофильтры – это более экономически эффективное решение, дающее возможности для масштабирования.

Использование вакуумных установок для понижения уровня грунтовых вод широко распространено. Оно основано на создании вакуума на водоприемных устройствах. Метод применяется в мелкозернистых, пылеватых и глинистых песках, супесях и легких суглинках с коэффициентом фильтрации от 0,01 до 2 м/сут. С помощью установок вакуумного водопонижения можно опустить уровень грунтовых вод до 9 м от поверхности. Вакуумирование усиливает эффект понижения воды и ускоряет формирование депрессионной воронки в непроницаемых грунтах. При использовании вакуума также можно осушить капиллярную зону насыщения водой, которая обычно остается недоступной в случае других методов. Для проведения водопонижения в грунт погружают иглофильтры, вокруг которых устраивается обсыпка из песка с размером частиц от 0,5 до 2 мм. В безнапорных слоях с коэффициентом фильтрации от 2 до 0,5 м/сут. высота обсыпки должна быть от 2,5 до 3,5 м от забоя скважины, в остальных вариантах обсыпка выполняется до поверхности земли [14].

Все представленные на текущий момент конструкции иглофильтров имеют существенные недостатки для использования в условиях леса: сложность в изготовлении конструкции, невозможность варьировать высоту иглофильтрационного звена и способ заглубления для качественного водопонижения [15].

Проанализировав информацию из источников, возможно полагать, что глубина залегания грунтовых вод в лесу по усредненным значениям не превышает 5 м. С опорой на труды М.И. Смородинова [14] необходимо выделить подходящие методики применения систем водопонижения (см. таблицу).

Ориентировочная область применения систем водопонижения An approximate scope of dewatering systems' application

Глубина понижения уровня грунтовых вод, м	Суглинок	Супесь	Песок				Гравий		Галечник чистый	Многослойная водоносная толща (чередование пород различной водопроницаемости)	
			мелкозернистый	мелкий	средний	крупный	крупный гравелистый	с песком			чистый
			Коэффициент фильтрации, м/сут.								
	0,005–0,4	0,2–0,7	1–2	2–10	10–25	25–50	50–100	75–150	100–200	>200	–
До 5	Электроосушение, вакуумирование (ЛИУ, ЭИ, ЕВВУ, УВВ-1м, УВВ-2)		Установки с легкими иглофильтрами ЛИУ (1-ярусные)				Откачка воды из скважин центробежным способом и насосами		Поверхностный водоотлив		Поверхностный водоотлив, ЛИУ, УВВ, сочетание ЛИУ с поверхностным водоотливом

Результаты исследования и их обсуждение

Разработанное модульное иглофильтрационное звено установки водопонижения [12] позволяет упростить конструкцию иглофильтра при более качественном водопонижении за счет извлечения грунтовых вод созданием разрежения методом вакуумирования. Это достигается использованием аддитивных технологий изготовления, с применением материалов на основе полилактида – биоразлагаемого, термопластичного алифатического полиэфира. Такой способ изготовления обеспечивает дальнейшую минимизацию отрицательных экологических аспектов применения установки. При этом возможно получать элементы сложной геометрической формы и варьировать параметры создаваемого образца [6]. Модульная конструкция иглофильтрационного звена позволяет непосредственно перед установкой смонтировать иглофильтрационное звено необходимой длины и использовать потенциал водоносного горизонта в полном объеме, что положительно сказывается на мобильности установки и качестве работ. Модульная система также дает возможность применять различные виды наконечников, варьируя способы заглубления (рис. 1).

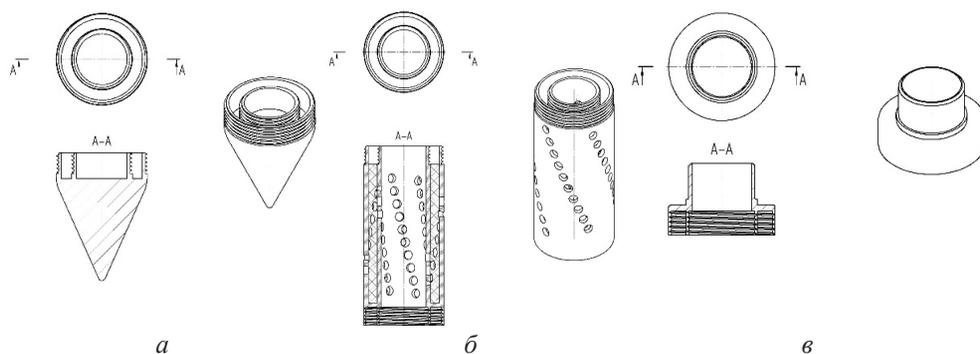


Рис. 1. Модульные элементы иглофильтрационного звена установки водопонижения
a – наконечник; *б* – основание; *в* – переходной элемент

Fig. 1. The modular elements of the wellpoint unit of the dewatering system:
a – tip; *b* – base; *c* – transition element

В отличие от аналогов, предлагаемое иглофильтрационное звено создано единым элементом, состоящим из внешнего и внутреннего перфорированных цилиндров, имеющих общую перегородку в нижней части, разделяющую модули иглофильтрационного звена на отдельные независимые емкости. При рабочем режиме водопонижения для применяемых конструкций иглофильтрационных элементов не исключена возможность засорения фильтрующего элемента частицами грунта. При попадании в 1 секцию иглофильтрационного звена частицы грунта не могут перемещаться по всей длине основания иглофильтрационного звена, и, следовательно, остальные секции будут работать в прежнем режиме. Фильтрующий элемент располагается в полости между перфорированными цилиндрами, что уменьшает вероятность снижения пропускной способности иглофильтрационного звена вследствие засорения. Использование аддитивных технологий при изготовлении секций фильтрующего звена позволяет изготавливать элементы с разной степенью перфорации как наружной, так и внутренней трубы, что положительным образом сказывается при работе на грунтах с различным коэффициентом фильтрации (рис. 2).

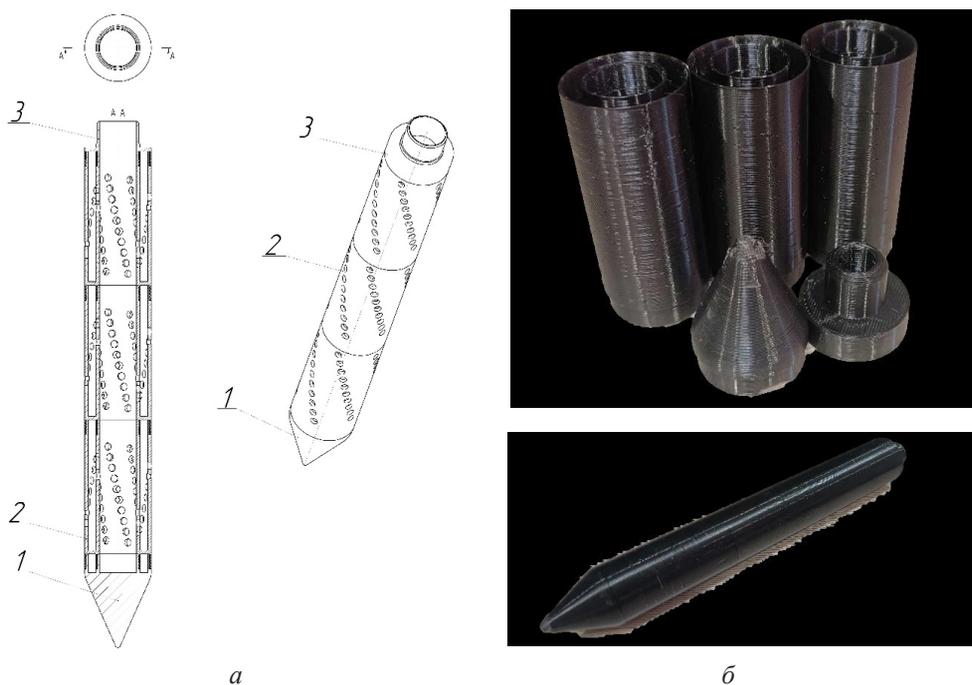


Рис. 2. Модульное иглофильтрационное звено установки водопонижения
а – схема сборки (1 – наконечник; 2 – основание; 3 – переходный элемент);
б – экспериментальный образец

Fig. 2. The modular wellpoint unit of the dewatering system: *a* – assembly diagram (1 – tip; 2 – base; 3 – transition element); *б* – experimental sample

Основание иглофильтрационного звена имеет наружный цилиндр фильтрового звена, выполненный с перфорацией, фильтрующий элемент, располагающийся в пространстве между наружным и внутренним цилиндрами фильтрового звена, также с перфорацией. Трубы в нижней части соединены перегородкой, придающей жесткость элементу и предотвращающей перемещение попадающих с водой частиц грунта по всей площади фильтрующего элемента игл фильтрационного звена. На концах основания иглофильтрационного звена выполнена резьба для модульного соединения элементов. Количество элементов варьируется в зависимости от заданных условий эксплуатации, что дает возможность задействовать весь водоносный горизонт для качественного процесса вакуумирования. К нижней части основания иглофильтрационного звена на резьбовое соединение монтируется наконечник конусообразной формы, увеличивающий продольную жесткость иглофильтрационного звена и позволяющий использовать вибрационный метод заглубления. В верхнюю часть основания иглофильтрационного звена крепится переходный элемент, используемый для коллекторного соединения всех установленных иглофильтрационных модулей с последующим подключением к вакуумному ресиверу.

В зависимости от типа грунта и от глубины залегания водоносного горизонта применяются различные методики установки иглофильтров: гидравлическим замыканием реверсной струей воды, предварительным бурением скважин с последующим погружением и обсыпкой крупнозернистым песком или мелким гравием, вибропогружением.

Извлечение грунтовых вод созданием разрежения методом вакуумирования возможно непосредственно после погружения необходимого количества иглофильтрационных модулей и их коллекторного монтажа с вакуумным ресивером [3].

Методика использования иглофильтрационных установок для водопонижения в лесном биотопе включает следующие шаги:

1. Идентификация оптимальных мест для размещения иглофильтрационных установок. Необходимо провести тщательное исследование лесного участка для определения наиболее подходящих мест для иглофильтров – мест с наличием водоносных пластов, доступных для техники и безопасных для пожарных бригад.

2. Установка иглофильтров. Это могут быть мобильные установки, размещаемые на специально подготовленных площадках, или стационарные установки, интегрированные в систему полевой пожарной инфраструктуры.

3. Подготовка и подключение водоснабжения. Для работы иглофильтров необходимо обеспечить подачу воды за счет подключения к водоносным пластам, использования ручных или механизированных насосов, а также создания водоемов или емкостей для хранения воды.

4. Активация и регулировка иглофильтров. После подключения водоснабжения следует активировать иглофильтры и настроить их для эффективной работы. Регулирование процесса водопонижения происходит с помощью специальных клапанов и систем контроля.

5. Мониторинг и обслуживание. В процессе использования иглофильтров необходимо непрерывно контролировать их работу, что включает в себя измерение давления, объема воды, а также регулярные техническую проверку и обслуживание установок.

6. Система управления и координация. Для эффективного использования иглофильтров в борьбе с лесными пожарами необходима хорошо организованная система управления и координации: оперативное информирование пожарных бригад о расположении и работе иглофильтровых установок, продумывание системы приоритетов и взаимодействия с другими методами тушения пожаров.

Использование вакуумных водопонижающих систем в лесопожарной деятельности является перспективным и малоисследованным направлением, поэтому для подтверждения эффективности необходимо произвести теоретические исследования и натурные испытания.

Расчет параметров системы водопонижения с использованием легких иглофильтров основывается на решении 2 уравнений. Одно из них описывает гидравлические характеристики иглофильтровой установки, а другое определяет условия фильтрации воды через грунт при работе этой установки. При расчете системы, включающей несколько установок, используется расчет только одной установки [1, 2, 17].

Первое уравнение представляется в виде:

$$y_{hr} = y_r - h_{pac} + \frac{\varepsilon q_{fh}}{(kn_{fh})} + 1,34^{-7} \theta Q_p^2,$$

второе уравнение с учетом фильтрационного сопротивления иглофильтров имеет вид:

для контурной системы

$$y_{hr} = H - S \left[1 + \frac{\Phi_{fh} T}{(n_p n_{fh} \Phi)} \right],$$

для линейной системы

$$y_{hr} = H - \frac{S(R + \sigma \Phi_{fh} T)}{\Phi},$$

где y_{hr} – высота от водоупора до сниженного уровня воды у иглофильтра, м; y_r – высота расположения оси насосного агрегата над водоупором; h_{pac} – понижение уровня воды, создаваемое одной иглофильтровой установкой; ε – коэффициент потерь напора в иглофильтре, принимаемый при продолжительности эксплуатации установки на 1 объекте до 1 мес., от 1 до 6 и более 6 мес. соответственно 0,3; 0,4 и 0,5 м³; q_{fh} – приток подземных вод к 1 иглофильтру, м³/сут., $q_{fh} = \frac{Q_p}{n_{fh}} < q_{fh.as}$, Q_p – приток подземных вод к 1 установке, м³/сут.; n_{fh} – число иглофильтров в установке, шт.; $q_{fh.as}$ – допускаемый приток к 1 иглофильтру, м³/сут.; k – коэффициент фильтрации грунта в прифильтровой зоне или песчано-гравийной обсыпке, $k = 15 \dots 25$ м/сут.; θ – коэффициент потерь напора во всасывающем коллекторе установки, сут./м³; H – напор подземных вод в водоносном слое, м; S – понижение уровня подземных вод в расчетной точке; Φ – внешнее фильтрационное сопротивление; Φ_{fh} – фильтрационное сопротивление 1 иглофильтра, принимаемое при расстоянии между иглофильтрами 0,75; 1,5; 2,25 и 3 м соответственно 1; 0,8; 0,7 и 0,65 м³; T – глубина водного потока на линии иглофильтров, м (при напорном режиме фильтрации $T = h$, при безнапорном $T = y_i$, i – гидравлический градиент); n_p – число установок в системе, шт.; R – радиус дисперсной воронки; σ – коэффициент пропорциональности между понижением уровня воды и притоком воды к системе иглофильтров.

Используя линейную систему установки иглофильтров, приведем уравнение к следующему виду:

$$H - \frac{S(R + \sigma \Phi_{fh} T)}{\Phi} = y_r - h_{pac} + \frac{\varepsilon q_{fh}}{(k n_{fh})} + 1,34^{-7} \theta Q_p^2.$$

Необходимым для исследования параметром является приток подземных вод к 1 иглофильтру

$$q_{fh} = \frac{(k n_{fh}) \left(H - \frac{S(R + \sigma \Phi_{fh} T)}{\Phi} - y_r + h_{pac} - 1,34^{-7} \theta Q_p^2 \right)}{\varepsilon}.$$

Так как для конкретного случая установка водопонижения используется вне сферы строительства, в которой варьируемые факторы исследованы более широко, в процессе проведения эксперимента также необходимо найти оптимальные число иглофильтров в установке, приток подземных вод к 1 установке, фильтрационное сопротивление 1 иглофильтра [13, 22].

Приток подземных вод к установке возможно определить по формуле

$$Q_p = \frac{khS}{\Phi},$$

где h – средняя глубина потока, равная $\frac{(H + y)}{2}$ при безнапорной фильтрации; y – напор подземных вод в расчетной точке, м [21].

Внешнее фильтрационное сопротивление (рис. 3) системы с линейным несовершенным дренажем в слое, содержащим безнапорные воды, определяется как

$$\Phi = \frac{2h}{l \left[\frac{S_c}{R} + \frac{1}{\frac{R}{2y_c} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{y_c}{\pi r_h}} \right]},$$

где S_c – динамический уровень воды; y_{hr} – высота от водоупора до сниженного уровня воды у иглофильтра; r_h – диаметр иглофильтра; l – расстояние между иглофильтрами, м.

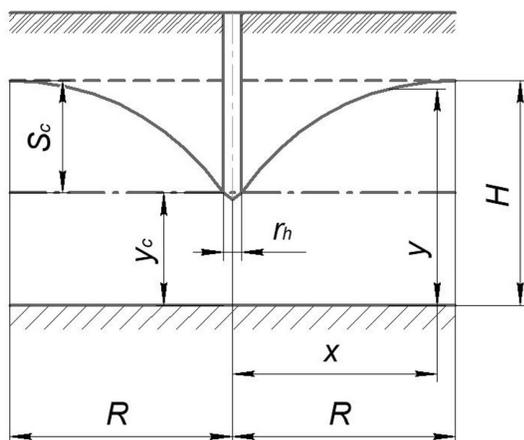


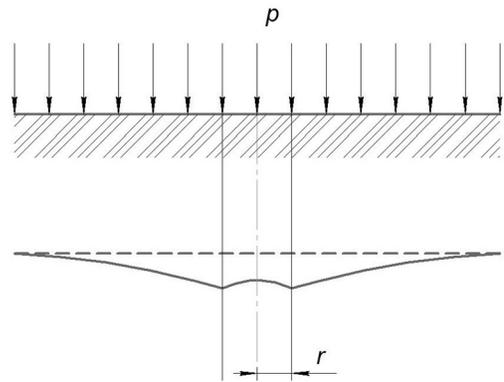
Рис. 3. Внешнее фильтрационное сопротивление системы с линейным несовершенным дренажем в слое, содержащим безнапорные воды
Fig. 3. The external flow coefficient of a system with linear imperfect drainage in a layer containing free groundwater

Определение радиуса депрессии (рис. 4) на неограниченном водоносном слое, питание которого происходит путем инфильтрации поверхностных вод с интенсивностью p , осуществляется по формуле

$$R = r + H \sqrt{\frac{k}{2p}}.$$

Рис. 4. Радиус депрессии
на неограниченном водоносном слое

Fig. 4. The depression radius
on an unconfined aquifer



Принимая коэффициент фильтрации грунта в прифильтровой зоне или песчано-гравийной обсыпке равный $k = 20$ м/сут.; число установок в системе $n_p = 1$ и коэффициент потерь напора в иглофильтре $\varepsilon = 0,3$ м, получим:

$$q_{fh} = \frac{20n_{fh} \left(H - \frac{IS \left(r + H \sqrt{\frac{20}{2p}} + \sigma \Phi_{fh} T \right) \left(\frac{S_c}{R} + \frac{1}{\frac{R}{2y_c} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{y_c}{\pi r_h}} \right)}{2h} - y_r + h_{pac} - 1,34^{-7} \theta Q_p^2 \right)}{0,3}$$

На основании этого уравнения возможно определить основные данные, необходимые для качественного анализа перспективности использования модульных иглофильтрационных установок в лесопожарной деятельности.

Заключение

Использование иглофильтрационных установок для водопонижения в лесном биотопе является важным инструментом при борьбе с лесными пожарами. Тем не менее, при разработке и реализации данной методики необходимо учитывать особенности конкретного региона, климатических условия и доступность водных ресурсов.

Применение новых конструкций модульных иглофильтров в лесопожарной деятельности играет важную роль в повышении эффективности борьбы с лесными пожарами и защите лесных ресурсов. Модульные иглофильтры представляют собой инновационное решение для предотвращения распространения огня и ограничения его воздействия на окружающую среду.

Одно из основных преимуществ модульных иглофильтров заключается в их мобильности и гибкости. Они могут быть быстро перемещены транспортно-технологическими комплексами на базе легких вездеходов, мини-тракторов, развернуты и смонтированы в нужных участках леса и целенаправленно перемещаться в зависимости от потребностей. Это особенно важно в условиях развития лесных пожаров с большой скоростью, когда необходимо немедленно принять меры для их тушения и предотвращения дальнейшего распространения.

Возможно и дальнейшее повышение эффективности модульных иглофильтров для лучшей борьбы с лесными пожарами, например, применение более эффективных материалов для фильтрации, увеличение мощности системы

воздушного всасывания, изменение конструкции для улучшения мобильности иглофильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Иванов А.А. Инженерный метод расчета несущей способности однородного основания щелевого фундамента // Вестн. Волгоград. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. № 33(52). С. 23–40.

Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Ivanov A.A. Engineering Method for Calculating the Bearing Capacity of a Homogeneous Base of a Trench Foundation. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* = Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture, 2013, no. 33(52), pp. 23–40. (In Russ.).

2. Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И., Коновалов П.А., Смородинов М.И., Сорочан Е.А., Бахолдин Б.В., Валеев Р.Х., Вронский А.В., Игнатова О.И., Мариупольский Л.Г., Смолин Б.С., Снарский А.С., Токин А.Н., Трофименков Ю.Г., Федоров Б.С., Юшки А.И., Демидов В.К., Иванов Л.И., Казанцев В.М., Коньков Н.К., Лабзов Ю.В., Лаш Е.Ф., Лешин Г.М., Михальчук В.А., Моргулис М.Л., Ханин Р.Е., Фомин Б.Н., Шапиро А.В. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.

Gorbunov-Posadov M.I., Il'ichev V.A., Krutov V.I., Konovalov P.A., Smorodinov M.I., Sorochan E.A., Bakholdin B.V., Valeev R.Kh., Vronskij A.V., Ignatova O.I., Mariupol'skij L.G., Smolin B.S., Snarskij A.S., Tokin A.N., Trofimenkov Yu.G., Fedorov B.S., Yushki A.I., Demidov V.K., Ivanov L.I., Kazantsev V.M., Kon'kov N.K., Labzov Yu.V., Lash E.F., Leshin G.M., Mikhail'chuk V.A., Morgulis M.L., Khanin R.E., Fomin B.N., Shapiro A.V. *Foundations, Bases and Underground Structures*. Under the gen. ed. by E.A. Sorochan and Yu.G. Trofimenkov. Moscow, Strojizdat Publ., 1985. 480 p. (In Russ.).

3. Григорьева О.И., Гринько О.И., Давтян А.Б., Григорьев И.В. Технология получения воды в лесу при помощи иглофильтров // Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса: материалы Всерос. науч. конф., посвящ. 90-летию Воронежск. гос. лесотехн. ун-та им. Г.Ф. Морозова. М.: Знание-М, 2020. С. 444–449.

Grigoreva O.I., Grin'ko O.I., Davtyan A.B., Grigorev I.V. Technology for Obtaining Water in the Forest Using Wellpoints. *Povyshenie effektivnosti upravleniya ustojchivym razvitiem lesopromyshlennogo kompleksa*: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov. Moscow, Znanie-M Publ., 2020, pp. 444–449. (In Russ.).

<https://doi.org/10.38006/907345-73-7.2020.444.449>

4. Григорьева О.И., Лоренц А.С., Григорьев И.В. Охрана труда и техника безопасности при эксплуатации иглофильтрационной установки для тушения лесных пожаров // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. С. 37–43.

Grigoreva O.I., Lorenz A.S., Grigorev I.V. Occupational Health and Safety during Operation of the Needle Filter Unit for Forest Fire Extinguishing. *Bezopasnost' i okhrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatybayushchem proizvodstvakh* = Occupational Health and Safety in Logging and Woodworking Industries, 2023, no. 1, pp. 37–43. (In Russ.).

5. Данилова С.С., Николаева В.М. Обнаружение лесных пожаров. Методы тушения лесных пожаров // Аллея науки. 2018. Т. 3, № 10(26). С. 380–383.

Danilova S.S., Nikolaeva V.M. Forest Fire Detection. Forest Fire Extinguishing Methods. *Alleya nauki*, 2018, vol. 3, no. 10(26), pp. 380–383. (In Russ.).

6. Комиссаров П.И. Применение аддитивных технологий для мониторинга уровня грунтовых вод в лесных массивах // Ломоносовск. науч. чтения студентов, аспиран-

тов и молодых ученых – 2023: сб. материалов конф.: в 2 т. Т. 2. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2023. С. 339–341.

Komissarov P.I. Application of Additive Technologies for Monitoring Groundwater Levels in Forest Areas. *Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh – 2023*: Collection of Conference Materials in 2 Volumes. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2023, vol. 2, pp. 339–341. (In Russ.).

7. Куницкая О.А., Новгородов Д.В., Марков О.Б. Проблемы эффективной переработки поврежденной лесным пожаром древесины // Комплексные вопросы аграрной науки и образования: сб. науч. ст. по материалам Внутривуз. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию Высш. аграр. образования Респ. Саха (Якутия) и Всерос. студенческой науч.-практ. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума – 2021». Якутск: Арктич. гос. агротехнол. ун-т, 2021. С. 285–291.

Kunitskaya O.A., Novgorodov D.V., Markov O.B. Problems of Efficient Processing of Forest Fire Damaged Timber. *Kompleksnye voprosy agrarnoy nauki i obrazovaniya*: Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the Intra-University Scientific and Practical Conference Dedicated to the 65th Anniversary of Higher Agricultural Education in the Republic of Sakha (Yakutia) and the All-Russian Student Scientific and Practical Conference with International Participation in the Framework of the “Northern Forum – 2021”. Yakutsk, Arctic State Agrotechnological University, 2021, pp. 285–291. (In Russ.).

8. Лоренц А.С. Применение установок водопонижения в лесных районах // Ломоносовск. науч. чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2022: сб. материалов конф.: в 2 т. Т. 2. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2022. С. 278–281.

Lorents A.S. Application of Water Level Lowering Plants in Forested Areas. *Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh – 2022*: Collection of Conference Materials in 2 Volumes. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2022, vol. 2, pp. 278–281. (In Russ.).

9. Лоренц А.С., Григорьев И.В. Перспективы использования установок водопонижения при тушении лесных пожаров // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск: Сиб. гос. ун-т науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 2022. С. 83–87.

Lorentz A.S., Grigoriev I.V. The Perspective of Water-Reduction Installations for Extinguishing Forest Fires. *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny*: Collection of Articles of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2022, pp. 83–87. (In Russ.).

10. Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Григорьева О.И., Гринько О.И., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Возможности использования садово-парковой техники для борьбы с низовыми лесными пожарами // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. ст. по итогам 6-й Междунар. науч. конф. Казань, 2020. С. 144–146.

Manukovskij A.Yu., Zorin M.V., Grigoreva O.I., Grinko O.I., Kunitskaya O.A., Grigorev I.V. The Possibilities of Using Gardening Equipment to Combat Ground Forest Fires. *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoj deyatel'nosti v promyshlennosti*: Collection of Scientific Articles Based on the Results of the 6th International Scientific Conference. Kazan, 2020, pp. 144–146. (In Russ.).

11. Никитин А.В., Королесов Д.А., Давыдов А.С. Стратегия тушения лесных пожаров // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. № 1(9). С. 333–336.

Nikitin A.V., Korolesov D.A., Davydov A.S. Forest Fire Extinguishing Strategy. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstvij chrezvychajnykh situatsij*, 2018, no. 1(9), pp. 333–336. (In Russ.).

12. Патент 2 797 754 РФ, МПК E02D 19/10 (2006.01), B33Y 80/00 (2015.01). Модульное иглофильтрационное звено установки водопонижения: № 2022128696: заявл. 07.11.2022; опубл. 08.06.2023 / А.С. Лоренц.

Lorents A.S. *Modular Wellpoint Unit for a Dewatering Installation*. Patent RF, no. RU 2 797 754 C1, 2023. (In Russ.).

13. Пособие по проектированию защиты горных выработок от подземных и поверхностных вод и водопонижения при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений (к СНиП 2.06.14-85 и СНиП 2.02.01-83). Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294850/4294850584.htm> (дата обращения: 03.09.25).

Manual on Designing Protection of Mine Workings from Underground and Surface Waters and Dewatering during the Construction and Operation of Buildings and Structures (for Building Code 2.06.14-85 and Building Code 2.02.01-83). (In Russ.).

14. Справочник по общественным работам. Основания и фундаменты / под общ. ред. М.И. Смородинова. М.: Стройиздат, 1974. 372 с.

Public Works Handbook. Foundations and Bases. Under the gen. ed. by M.I. Smorodinov. Moscow, Strojizdat Publ., 1974. 372 p. (In Russ.).

15. Рыбалкина А.В., Мамонтов И.А., Бабаскин Е.С., Скряпник М.Э. иглофильтровый способ понижения грунтовых вод // Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки: сб. ст. Междунар. науч.- практ. конф. Тюмень: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2019. С. 65–67.

Rybalkina A.V., Mamontov I.A., Babaskin E.S., Skrypnik M.E. Wellpoint Method for Lowering Groundwater. *Intellectual'nyj potentsial obshchestva kak drajver innovatsionnogo razvitiya nauki*: Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference. Tyumen', International Centre of Innovation Studies "Omega Science", 2019, pp. 65–67. (In Russ.).

16. Brassington F., Preece M. The Design, Construction and Testing of a Horizontal Wellpoint in a Dune Sands Aquifer as a Water Source. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2003, vol. 36, iss. 4, pp. 355–366.

<https://doi.org/10.1144/1470-9236/03-002>

17. Chu J., Varaksin S., Klotz U., Mengé P. Construction Processes. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009, pp. 3006–3135. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-3006>

18. Grigorev V.M. Calculation of Complete Interception of Groundwater Inflow to "Perfect" Trenches by Light Wellpoint Installations. *Hydrotechnical Construction*, 1983, vol. 17, pp. 618–626. <https://doi.org/10.1007/BF01427527>

19. Krivoshapkina O., Yakovleva A., Pavlova A., Eroshenko V., Zakharova A., Gogoleva P., Tikhonov E., Kunickaya O. Environmental Safety of Residents of Yakutsk and Zhaytay: Evidence from Sociological Research. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 2022, vol. 12, pp. 566–576. <https://doi.org/10.1007/s13412-022-00764-y>

20. Lukina A., Lisyatnikov M., Martinov V., Kunitskaya O., Chernykh A., Roschina S. Mechanical and Microstructural Changes in Post-Fire Raw Wood. *Architecture and Engineering*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 44–52. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52>

21. Sagintayev Z., Yerikuly Z., Zhaparkhanov S., Panichkin V., Miroshnichenko O., Mashtayeva S. Groundwater Inflow Modeling for a Kazakhstan Copper Ore Deposit. *Journal of Environmental Hydrology*, 2015, vol. 23, pp. 9–22.

22. Tang Y., Zhou J., Yang P., Yan J., Zhou N. Wellpoint Dewatering in Engineering Groundwater. *Groundwater Engineering*. Singapore, Springer Natural Hazards, 2017, pp. 183–261. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0669-2_5

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630.266:581.55(470.620)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-81-91

Ясеновые полезащитные лесные полосы Кореновского района Краснодарского края

Н.В. Примаков^{1,2}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABD-8930-2021](https://orcid.org/0000-0001-9225-024X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

¹Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, Россия, 350040; nik-primakov@yandex.ru

²Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044; nik-primakov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.04.24 / Одобрена после рецензирования 02.08.24 / Принята к печати 05.08.24

Аннотация. От состояния лесомелиоративных комплексов зависит урожайность сельскохозяйственных культур, а следовательно, и продовольственная безопасность страны. Среди древесных пород, применяемых для создания полезащитных лесных полос в Краснодарском крае, высока (30 %) доля ясеневых посадок. Целью работы является оценка состояния ясеневых полезащитных лесных полос Кореновского района Краснодарского края, определение возможности выполнения ими агролесомелиоративных функций, предложение системы мероприятий, направленных на восстановление жизненного состояния и продление срока службы лесонасаждений. Объекты исследования расположены на территории сельхозпредприятия ООО «Сфера» Кореновского района Краснодарского края. В ходе работ использованы общепринятые методики и рекомендации. Средние таксационные показатели доминирующих древесных видов в ясеневых полезащитных лесных полосах составили: высота – 9,4 м, диаметр на высоте груди – 18,2 см, бонитет – IV класс. Полезащитные лесные полосы, состоящие из ясеня зеленого (*Fraxinus lanceolate* Borch.) и ясеня пушистого (*F. pubescens* Marsh.) в большинстве своем имеют неудовлетворительное состояние. Они характеризуются средней (4-й) категорией санитарной оценки – усыхающие насаждения. Средний коэффициент сохранности деревьев – 0,3. Установлено, что в насаждениях распространены опасные насекомые-вредители: древесница въедливая (*Zeuzera pyrina* L.), стеклянница (Sesiidae), ясеневая цикада (*Cicada orni* Linnaeus), американская ясеневая тля (*Prociphilus fraxinifolii* Riley) и др. Кроме того, у 47 % обследованных насаждений отмечается несоблюдение рекомендуемых конструкций лесных полос. Встречаются также лесные полосы с различными комбинациями участков разных конструктивных особенностей. Защитное воздействие таких участков лесополос на агроландшафты неравномерное, что, в свою очередь, сказывается на снижении мелиоративного влияния и недоборе сельскохозяйственной продукции. Собственникам лесных полос в этом случае рекомендуется проведение мероприятий, направленных на восстановление жизненного состояния полезащитных лесных полос. При проведении коренной реконструкции лесных полос рекомендуем вводить в состав насаждений такие устойчивые древесные породы, как дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), дуб пушистый (*Q. pubescens* Marsh.), робинию лжеакацию (*Robinia pseudoacacia* L.), гледичию трехколючковую (*Cleditsia triacanthos* L.) и др. Лесному хозяйству и собственникам лесных полос для создания нового поколения полезащитных лесных полос не рекомендуется использование ясеня зеленого и ясеня пушистого.

© Примаков Н.В., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: лесная полоса, ясень, конструкция, вредители, система мероприятий

Для цитирования: Примаков Н.В. Ясеновые ползащитные лесные полосы Кореновского района Краснодарского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 81–91. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-81-91>

Original article

Ash Forest Shelterbelts of the Korenovsky District of the Krasnodar Territory

Nikolay V. Primakov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABD-8930-2021](https://orcid.org/0000-0001-9225-024X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

¹Kuban State University, ul. Stavropol'skaya, 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation; nik-primakov@yandex.ru

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, ul. Kalinina, 13, Krasnodar, 350044, Russian Federation; nik-primakov@yandex.ru

Received on April 30, 2024 / Approved after reviewing on August 2, 2024 / Accepted on August 5, 2024

Abstract. The yield of agricultural crops and, consequently, the country's food security depend on the state of forest reclamation complexes. Among the tree species used to create forest shelterbelts in the Krasnodar Territory, the proportion of ash plantations is high (30 %). The aim of the research has been to assess the condition of ash shelterbelts in the Korenovsky District of the Krasnodar Territory, determine the possibility of their performing agroforestry reclamation functions, and propose a system of measures aimed at restoring the vitality and extending the service life of forest plantations. The research objects have been located on the territory of the agricultural enterprise LLC "Sfera" of the Korenovsky District of the Krasnodar Territory. Generally accepted methods and recommendations have been used in the course of the work. The average inventory indicators of the dominant tree species in ash shelterbelts have been: height – 9.4 m, diameter at breast height – 18.2 cm, quality class – IV. The forest shelterbelts consisting of green ash (*Fraxinus lanceolata* Borch.) and downy ash (*F. pubescens* Marsh.) are mostly in an unsatisfactory condition. They are characterized by the average (4th) category of sanitary conditions – drying out plantings. The average survival rate of trees is 0.3. It has been established that dangerous insect pests are common in the plantings, including leopard moth (*Zeuzera pyrina* L.), clearwing moth (Sesiidae), ash cicada (*Cicada orni* Linnaeus), American ash aphid (*Prociphilus fraxinifolii* Riley), etc. In addition, 47 % of the surveyed plantings have shown non-compliance with the recommended designs of forest belts. There are also forest belts with various combinations of sections with different design features. The protective effect of such forest belt areas on agricultural landscapes is uneven, which, in turn, results in a decrease of land reclamation effects and shortage of agricultural products. In this case, forest belt owners are recommended to carry out measures aimed at restoring the vitality of forest shelterbelts. When carrying out a radical reconstruction of forest belts, we recommend introducing such resistant tree species as English oak (*Quercus robur* L.), downy oak (*Q. pubescens* Marsh.), black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), honey locust (*Cleditsia triacanthos* L.), etc. Forestry and forest belt owners are not recommended to use green ash and downy ash to create a new generation of forest shelterbelts.

Keywords: forest belt, ash, design, pests, system of measures

For citation: Primakov N.V. Ash Forest Shelterbelts of the Korenovsky District of the Krasnodar Territory. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 81–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-81-91>

Введение

Состояние лесомелиоративных комплексов оказывает влияние на урожайность сельскохозяйственных культур [20, 22], а следовательно, и на продовольственную безопасность страны. Площадь земель сельскохозяйственного назначения Краснодарского края составляет 4707,2 тыс. га. В агролесомелиоративном обустройстве территории Краснодарского края высока доля ясеневых пород. Так, по данным [14], ясеневые лесные полосы расположены на площади 38,3 тыс. га, что в процентном отношении составляет 30 % от общей территории полезащитных лесных полос.

Большой вклад в изучение систем защитных лесных насаждений внесли ряд российских и зарубежных ученых [3–5, 8–10, 17–19, 21]. А.С. Манаенков [6], изучавший лесные полосы, расположенные в равнинной части Северного Кавказа, приходит к выводу о том, что на каштановых почвах насаждения 50–60 гг. прошлого века полностью распались. На черноземных почвах они сохранились полностью, но для улучшения защитных свойств нуждаются в лесохозяйственных мероприятиях.

З.А. Бекух с соавторами [1] установлено, что более 80 % лесных полос Краснодарского края не выполняют своих защитных и мелиоративных функций. Большинство из них на сегодняшний день имеют возраст более 60 лет, отмечается отсутствие агротехнических и лесоводственных уходов за ними, а комплексная эффективность их авторами признается нулевой.

В.В. Танюквич, исследовав лесные полосы из ясеня зеленого (*Fraxinus lanceolata* Borch.) в 2006–2009 гг. на территории Ростовской области, установил, что активный рост этой породы прекращается к возрасту 60–65 лет. Ученый отметил ослабление защитного воздействия лесных полос на прилегающие агроландшафты. В зависимости от конструкции лесных полос влияние на прилегающие поля 1 га лесной полосы составило: ажурной конструкции – на площади 11,7–22,8 га, плотной – 7,6–12,3 га [13].

На необходимость создания защитных лесных насаждений в степной части России указывается в работах В.Д. Тюнякина с соавт. [15], Ю.И. Чевердина с соавт. [16]. А.С. Соломенцева [12], исследовавшая состояние лесных полос Калачеевского района Волгоградской области, приходит к выводу о необходимости исключения ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.) из списка рекомендуемых древесных пород для создания полезащитных лесных полос (ПЗЛП). Таким образом, мы наблюдаем разные оценки современного состояния ПЗЛП.

Целью работы является дать характеристику состояния ясеневых ПЗЛП Кореновского района Краснодарского края с определением возможности выполнения ими агролесомелиоративных функций и разработкой рекомендаций, направленных на восстановление жизненного состояния и продление срока службы лесонасаждений.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали ясеневые ПЗЛП, расположенные на территории сельхозпредприятия ООО «Сфера», вблизи станицы Платнировская Кореновского района Краснодарского края.

Климат в районе исследования – умеренно континентальный: среднегодовая температура воздуха составляет 12,4 °С; сумма осадков за год – 510–620 мм.

В районе работ после проведения рекогносцировочного обследования территории было выбрано 15 основных ясеневых ПЗЛП. Каждой из них был присвоен порядковый номер (рис. 1).

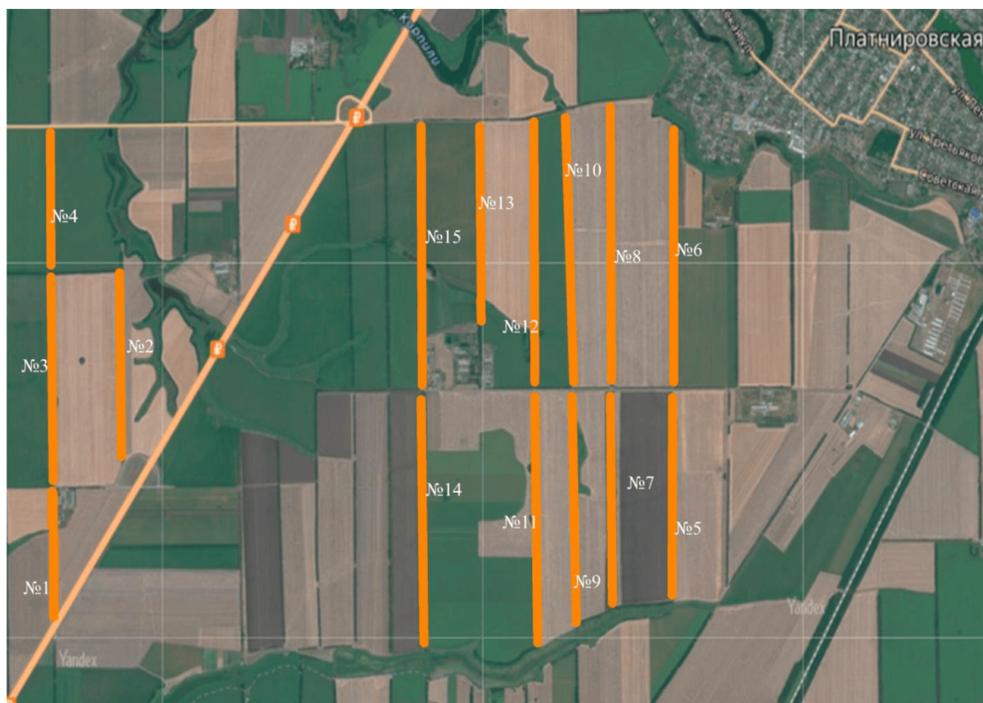


Рис. 1. Схема расположения ясеневых ПЗЛП в районе исследования

Fig. 1. The layout of ash forest shelterbelts in the study area

Исследование проведено по общепринятым методикам и рекомендациям. Основные параметры лесных насаждений устанавливались на пробных площадях, заложенных в соответствии с ОСТ 56-69-83. Конструкция лесных полос определена фотооптическим методом. В отдельной лесной полосе, где фиксировались комбинации участков с разными конструктивными особенностями, результирующая конструкция определена как среднее значение для всех участков лесополосы. Жизнеспособность деревьев и древостоев в лесных полосах оценена по шкале категорий состояния деревьев (постановление Правительства РФ от 09.12.2020 № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах»). Рост древесных растений в высоту и по диаметру изучен по общепринятой методике [7]. Коэффициент сохранности деревьев в лесных полосах (%) находился как отношение количества существующих деревьев в лесной полосе на момент исследования к общему количеству деревьев при создании. Полевой материал обработан с помощью электронной таблицы Excel, статистического пакета Statistica 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные характеристики ясеневых ПЗЛП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики 63-летних ясеневых ПЗЛП на пробных площадях
The main characteristics of 63-year-old ash forest shelterbelts in the sample plots

ПЗЛП	Состав	Высота, м*	Диаметр ствола, см*	Категория состояния древостоев	Класс бонитета	Коэффициент сохранности
1	9Я ₃ 1Я _п +Кл _т	10,5±1,1	12,4±1,8	3	III	0,49
2	7Я _п 2Я ₃ 1Я _о +Ал	11,0±0,4	11,4±1,2	3	III	0,28
3	8Я ₃ 1Я _п 1Кл _т + Вшн _м , Б _ч	8,4±0,9	15,5±1,4	4	IV	0,34
4	7Я _п 2Я ₃ 1Кл _т +А _о	8,2±0,4	17,1±1,1	4	IV	0,33
5	8Я ₃ 2Я _п +Кл _т , Р _{лж}	8,3±0,4	11,1±1,4	3	III	0,23
6	8Я _п 2Я ₃ +Д _п АлБ _ч	8,8±0,4	19,2±1,1	3	IV	0,25
7	8Я ₃ 2Я _п +Д _п Кл _т	8,7±0,7	16,7±3,0	3	IV	0,27
8	9Я _п 1Д _ч +Б _ч	8,5±0,6	18,0±8,5	5	IV	0,28
9	8Я _п 2Я ₃ +Гл _т Д _ч	10,0±0,6	22,3±2,3	3	IV	0,13
10	7Р _{лж} 3Я ₃ +Д _ч Б _ч	10,7±0,9	16,3±2,0	3	III	0,37
11	10Я _п +Я ₃	10,0±0,9	23,6±2,2	4	IV	0,34
12	10Я _п	8,7±0,8	19,0±2,4	4	IV	0,34
13	8Я _п 2Р _{лж} +Гл _т	9,3±0,5	19,6±1,7	4	V	0,41
14	9Я _п 1Я ₃ +К _ю	8,8±0,6	19,5±2,2	4	IV	0,22
15	9Я _п 1Гл _т +Б _ч А _о	11,4±0,9	31,6±2,8	4	IV	0,17
Среднее		9,4	18,2	3,6	3,8	0,30

Примечание: А_о – абрикос обыкновенный; Ал – алыча; Б_ч – бузина черная; Вшн_м – вишня магадебская; Гл_т – гледичия трехколочковая; Д_п – дуб пушистый; Д_ч – дуб черешчатый; К_ю – каркас южный; Кл_т – клен татарский; Р_{лж} – робиния лжеакация; Я₃ – ясень зеленый; Я_о – ясень обыкновенный; Я_п – ясень пенсильванский. *Указаны средние показатели роста доминирующих древесных пород по составу насаждений с ошибкой.

По составу преобладают насаждения, созданные по древесному и древесно-кустарниковому типам смешения. В качестве главных древесных пород чаще всего встречаются ясень зеленый и ясень пушистый (*Fraxinus pubescens* Marsh.). На некоторых участках лесополос отмечены такие древесные породы, как дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) и дуб пушистый (*Q. pubescens* Marsh.), робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.), гледичия трехколочковая (*Cleditsia triacanthos* L.). Встречаемость данных растений в лесных полосах варьировала от 1 до 10 %. Участки лесополос с этими породами в составе оказались более устойчивы к распаду и имели лучшее санитарное состояние.

Общая категория оценки санитарного состояния насаждений из ясеня зеленого и ясеня пушистого – 3,6 – усыхающие. Большинство деревьев в таких лесополосах повалены, засохли, не дают прироста и имеют в кронах многочисленное количество сухих ветвей. Листья в основном скручены, а деревья поражены насекомыми-вредителями и болезнями.

Нами выявлены насекомые-вредители ясеневых насаждений (рис. 2), основные из которых древесница вьедливая (*Zeuzera pyrina* L.), стеклянница (Sesiidae), ясеневая цикада (*Cicada orni* Linnaeus), американская ясеневая тля

(*Prociophilus fraxinifolii* Riley) и др., способствовавшие ухудшению жизненного состояния изученных древесных пород. Наиболее серьезный вред наносит ясеневым насаждениям древесница въедливая (*Zeuzera pyrina* L.). На распространение насекомых-вредителей в многорядных (более 3 рядов) лесных полосах обратил в свое время внимание и И.Р. Грибуст [2].

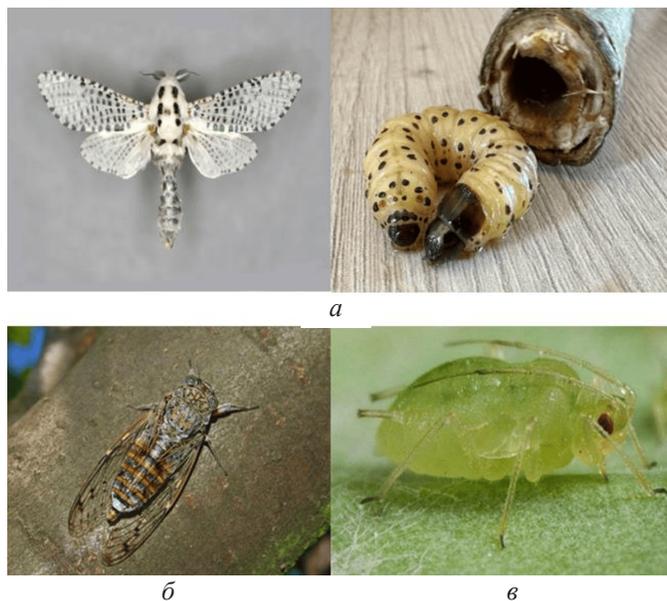


Рис. 2. Основные насекомые-вредители ясеневых ПЗЛП в районе исследования:
 а – древесница въедливая; б – ясеневая цикада; в – тля на ясене

Fig. 2. The main insect pests of ash forest shelterbelts in the study area:
 а – leopard moth; б – ash cicada; в – aphid on an ash tree

Анализ космических снимков ПЗЛП, проведенный Н.В. Примаковым с соавторами [11], свидетельствует о несоблюдении рекомендуемой конструкции лесных полос. В ходе нашего исследования установлено, что часть ПЗЛП имеют расстроенное состояние. Большую часть из них можно разделить на участки с различными комбинациями конструктивных особенностей. Защитное воздействие таких участков на агроландшафты неравномерное. Примером подобных участков является нижняя зона лесной полосы, имеющая плотную конструкцию, в совокупности с продуваемым верхом (рис. 3). Встречались также участки в лесополосах с полностью засохшими деревьями, состоящие только из кустарников и немногочисленного подроста (рис. 4).



Рис. 3. Общий вид лесополосы № 1 плотной конструкции
 Fig. 3. The general view of forest belt no. 1 of dense design



Рис. 4. Общий вид лесополосы № 4 ажурной конструкции

Fig. 4. The general view of forest belt no. 4 of openwork design

Краткая характеристика конструктивных особенностей изученных ПЗЛП и рекомендуемые мероприятия по исправлению их жизненного состояния и продлению срока службы представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Рекомендации по исправлению жизненного состояния
и продлению срока службы ПЗЛП в районе исследования**
**The recommendations for correcting the vitality and extending the service life
of the forest shelterbelts in the study area**

ПЗЛП	Количество просветов, %	Тип конструкции насаждения	Примечание	Предлагаемые мероприятия
1	10	Плотная	Низ полосы – плотный, верх – ажурно-плотный, вторично-сукцессионные процессы	Рубки ухода, санитарные и возобновительные рубки
2	40	Ажурная	Нижняя часть полосы плотная, средняя и верхняя – ажурно-продуваемые	Рубки ухода
3	55	Продуваемая	С нижней части до середины лесная полоса плотной конструкции, оставшаяся половина – продуваемой, вторичные сукцессионные процессы	Санитарные и возобновительные рубки, реконструкция насаждения
4	38	Ажурная	Полоса расстроенная, низ – плотной конструкции, оставшаяся часть – ажурно-продуваемой	Рубки ухода, санитарные и возобновительные рубки
5	12	Плотная	Сильно заросла кустарником и деревьями, есть сухостой	Рубки ухода и перестройки, санитарные рубки
6	30	Ажурная	Расстроенная, низ плотный, средняя и верхняя части – ажурные, встречается продуваемая конструкция, вторичные сукцессионные процессы	Санитарные и возобновительные рубки, реконструкция насаждения
7	41		С нижней части до середины лесная полоса – плотной конструкции, оставшаяся половина – продуваемой, вторичные сукцессионные процессы	Санитарные и возобновительные рубки, реконструкция насаждения

Окончание табл. 2

ПЗЛП	Количество просветов, %	Тип конструкции насаждения	Примечание	Предлагаемые мероприятия
8	37	Ажурная	С нижней части до середины лесная полоса плотной конструкции, оставшаяся половина – продуваемой, до 5 % деревьев фаутные	Санитарные и возобновительные рубки, реконструкция насаждения
9	14	Плотная	Нижняя часть полосы плотная, верхняя – ажурная, иногда чередуются участки с плотной конструкцией	Рубки ухода и переформирования, санитарные рубки
10	3		Сильно заросла кустарником и деревьями, есть сухостой	Рубки ухода и переформирования, санитарные рубки
11	56	Продуваемая	Расстроенная, с вторичными сукцессионными процессами	Реконструкция лесной полосы, санитарные рубки
12	21	Ажурная	Чередование участков плотной, продуваемой и ажурной конструкции, вторичные сукцессионные процессы	Реконструкция участков лесной полосы, санитарные рубки, рубки ухода и переформирования, дополнение
13	12	Плотная	Сильно заросла кустарником и деревьями, есть сухостой	Рубки ухода и переформирования, санитарные рубки
14	35	Ажурная	Чередование участков плотной, продуваемой и ажурной конструкции, вторичные сукцессионные процессы	Реконструкция участков лесной полосы, санитарные рубки, рубки ухода и переформирования, дополнение
15	40		Чередование участков плотных и продуваемых, выпады целых участков, вторичные сукцессионные процессы	Реконструкция участков лесной полосы, санитарные рубки, рубки ухода и переформирования, дополнение

Из табл. 2 следует, что из 15 обследованных ясеневых ПЗЛП 5 имеют плотную конструкцию, 8 – ажурную, 2 – продуваемую. Таким образом, конструкция только 8 лесных полос соответствует рекомендуемой для района исследования. Конструкция 7 лесных полос имеет несоответствия, что, в свою очередь, сказывается на снижении мелиоративного влияния и недоборе сельскохозяйственной продукции.

Для улучшения жизненного состояния и продления срока службы ПЗЛП рекомендуется проведение системы мероприятий. Основными из них являются санитарные рубки, рубки ухода, реконструкции и переформирования, реконструкция части лесных полос или полное их восстановление, а также проведение лесозащитных мероприятий и агротехнических уходов на закрайках лесополос.

Заключение

Установлено, что большинство полезащитных лесных полос из ясеня зеленого и ясеня пушистого имеют неудовлетворительное жизненное состояние. Средняя категория жизненного состояния – 3,6, категория санитарной оценки – усыхающие насаждения. Средний коэффициент сохранности деревьев в лесополосах – 0,3. Одной из причин снижения сохранности посадок является распространение таких опасных насекомых-вредителей, как древесница вьедливая, стеклянница, ясеневая цикада, американская ясеневая тля и др. Кроме того, у 47 % обследованных насаждений отмечается несоблюдение рекомендуемых конструкций лесных полос.

Собственникам лесных полос нами рекомендуется проведение мероприятий в течение всей жизни насаждений для их восстановления и продления срока службы. При коренной реконструкции лесных полос в состав посадок необходимо вводить такие устойчивые древесные породы, как дубы черешчатый и пушистый, робинию лжеакацию, гледичию трехколючковую и др. Для выращивания нового поколения полезащитных лесных полос не рекомендуется использовать ясеня зеленый и ясеня пушистый.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бекух З.А., Колядченко В.Э., Куница В.В., Рева В.В. Динамика площадей лесополос на территории Краснодарского края // Региональные географические исследования: сб. науч. тр. / под общ. ред. А.В. Погорелова. Вып. 13. Краснодар: Кубанск. гос. ун-т, 2020. С. 126–129.

Bekukh Z.A., Kolyadchenko V.E., Kunitsa V.V., Reva V.V. Dynamics of Forest Belt Areas in the Krasnodar Territory. *Regional Geographical Research: Collection of Scientific Papers*. Under the gen. ed. of A.V. Pogorelov. Krasnodar: Kuban State University, 2020, iss. 13, pp. 126–129. (In Russ.).

2. Грибуст И.Р. Экологические элементы активизации энтомофагов в насаждениях засушливой зоны // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. 2019. Т. 9, № 1. С. 55–70.

Gribust I.R. Environmental Elements for Revitalization of Entomophages in the Forest Plantations of the Arid Zone. *Nauka. Mysl': Electronic Periodical Journal = World Ecology Journal*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 55–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.25726/NM.2019.86.67.004>

3. Ерусалимский В.И., Рожков В.А. Многофункциональная роль защитных лесных насаждений // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 121–137.

Erusalimskii V.I., Rozhkov V.A. The Multifunctional Role of Protective Forest Plantations. *Vyulleten' Pochvennogo instituta imeniv V.V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, iss. 88, pp. 121–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-121-137>

4. Есков Д.В. Закономерности воздействия конструкций лесных полос и удобрений на микроклимат и урожайность яровой пшеницы на южном черноземе // Успехи соврем. естествознания. 2022. № 5. С. 12–18.

Eskov D.V. Regularities of the Impact of Forest Strip Constructions and Fertilizers on the Microclimate and Yield of Spring Wheat in the Southern Chernozem. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 2022, no. 5, pp. 12–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37818>

5. Ивонин В.М. Синергетика систем агролесомелиорации // Региональн. геосистемы. 2023. № 47(1). С. 62–75.

Ivonin V.M. Synergetics of Agroforestry Systems. *Regional'nye geosistemy = Regional Geosystems*, 2023, vol. 47, no. 1, pp. 62–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-62-75>

6. Манаенков А.С. Подходы к улучшению состояния полезащитных лесных полос на Северном Кавказе // Лесоведение. 2023. № 4. С. 412–426.

Manaenkov A.S. Approaches to Improving the State of the Shelterbelts in the Northern Caucasus. *Lesovedenie*, 2023, no. 4, pp. 412–426. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S002411482304006X>

7. Методы изучения лесных сообществ / под ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузовой. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.

Methods for Studying Forest Communities. Ed. by V.T. Yarmishko, I.V. Lyanguzova. St. Petersburg, Institute of Chemistry of St. Petersburg State University, 2002. 240 p. (In Russ.).

8. Примаков Н.В. Влияние лесных насаждений на продуктивность степного разнотравья // Земледелие. 2007. № 1. С. 10.

Primakov N.V. The Influence of Forest Plantations on the Productivity of Steppe Forbs. *Zemledelie*, 2007, no. 1, p. 10. (In Russ.).

9. Примаков Н.В. Биоэнергетическая эффективность агроландшафтов Ростовской области // Лесн. хоз-во. 2008. № 3. С. 33–35.

Primakov N.V. Bioenergetic Efficiency of Agricultural Landscapes of the Rostov Region. *Lesnoe khozyajstvo*, 2008, no. 3, pp. 33–35. (In Russ.).

10. Примаков Н.В. Изменчивость лесоводственных характеристик полезащитных лесных насаждений Краснодарского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 60–68.

Primakov N.V. Variability of Silvicultural Characteristics of Forest Shelterbelts in Krasnodar Krai. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 60–68. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-60-68>

11. Примаков Н.В., Латифова А.С., Дубровин Е.Ю. Эффективность конструкции полезащитных лесных насаждений Краснодарского края // Успехи соврем. естествознания. 2022. № 10. С. 41–45.

Primakov N.V., Latifova A.S., Dubrovin E.Yu. The Effectiveness of the Design of Protective Forest Plantations of the Krasnodar Region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2022, no. 10, pp. 41–45. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17513/use.37905>

12. Соломенцева А.С. Состояние древесных растений на объектах защитного лесоразведения и озеленения Калачевского района Волгоградской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 58–72.

Solomentseva A.S. The Condition of Woody Plants at the Sites of Protective Afforestation and Landscaping of the Kalachevsky District, Volgograd Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 58–72. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-58-72>

13. Таныукевич В.В. Мелиоративная эффективность лесных полос ясеня ланцетного в условиях степных агроландшафтов // Изв. Нижневолж. агроуниверситетск. комплекса. 2011. № 2(22). С. 1–4.

Tanyukevich V.V. Meliorative Efficiency of Forest Belts of Lanceolate Ash in Conditions of Steppe Agricultural Landscapes. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa* = Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex, 2011, no. 2(22), pp. 1–4. (In Russ.).

14. Теучезж А.А. Создание условий устойчивого развития и функционирования системы защитных лесных насаждений в Краснодарском крае // Отходы, причины их образования и перспективы использования: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. эколог. конф. Краснодар: КубГАУ, 2019. С. 644–648.

Teuchezh A.A. Creation of Conditions for Sustainable Development and Functioning of the System of Protective Forest Plantations in the Krasnodar Territory. *Otkhody, prichiny ikh obrazovaniya i perspektivy ispol'zovaniya*: Collection of Scientific Papers based on the Materials of the International Scientific Environmental Conference. Krasnodar, Kuban State Agricultural University, 2019, pp. 644–648. (In Russ.).

15. Тунякин В.Д., Вавин В.С., Рыбалкина Н.В. Новое о лесообразовательном процессе в лесных полосах Каменной Степи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 89–100.

Tunyakin V.D., Vavin V.S., Rybalkina N.V. Recent Trends of Forest Formation in Forest Strips of the Kamennaya Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 6, pp. 89–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.89>

16. Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Сауткина М.Ю., Титова Т.В. Эколого-агрохимическая оценка почв Каменной Степи под лесным ценозом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 76–91.

Cheverdin Yu.I., Bepalov V.A., Sautkina M.Yu., Titova T.V. Ecological and Agrochemical Assessment of the Kamennaya Steppe Soils under Forest Cenosis. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 5, pp. 76–91. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-76-91>

17. Чеплянский И.Я., Турчин Т.Я., Ермолова А.С. Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 44–59.

Cheplyanskij I.Ya., Turchin T.Ya., Ermolova A.S. Remote Monitoring of State Forest Shelterbelts in the Steppe Zone of European Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 44–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-44-59>

18. Barsukova G.N., Derevenets D.K., Litra E.N. Ecological Factors of Increasing the Efficiency of the Use and Protection of Protective Forest Strips. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, vol. 979, art. no. 012182.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012182>

19. Camba Sans G.H., Verón S.R., Paruelo J.M. Forest Strips Increase Connectivity and Modify Forests' Functioning in a Deforestation Hotspot. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 290, art. no. 112606. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112606>

20. Panfilov A.V., Popov V.G., Proezdov P.N., Udalova O.G., Karpova O.V., Mavzovin V.S., Matyushkina O.L., Panfilova E.G., Martynov E.N., Motova Yu.V., Mariskin R.V., Lazarev A.A. The Yield of Spring Wheat Depending on the Designs of Forest Strips in the Steppe of the Volga Upland. *Current Problems of the Forest Complex*, 2023, no. 63, pp. 3–6.

21. Pouliot D.A., King D.J., Pitt D.G. Development and Evaluation of an Automated Tree Detection-Delineation Algorithm for Monitoring and Regenerating Coniferous Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 10, pp. 2332–2345.

<https://doi.org/10.1139/x05-145>

22. Trubacheva L.V., Mukhina O.V., Vlasova O.I., Drepa E.B., Loshakov A.V. The Ameliorative Role of Forest Strips in Crop Yield Conservation. *The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems*. Springer, Cham, 2021, vol. 206, pp. 963–969.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-72110-7_106

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*181.6:630*232:630*174.752(470.51/.54)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-92-106

Лесоводственная оценка 47-летних культур пихты сибирской на Среднем Урале

Г.Г. Терехов[✉], *д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.*; *ResearcherID: AAC-8684-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

Е.М. Андреева, *канд. биол. наук, ст. науч. сотр.*; *ResearcherID: AAD-3340-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

С.К. Стеценко, *канд. биол. наук, ст. науч. сотр.*; *ResearcherID: AAD-2834-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-3817>

Н.Н. Теринов, *д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.*; *ResearcherID: N-2884-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144;
terekhov_g_g@mail.ru[✉], e_m_andreeva@mail.ru, stets_s@mail.ru, n_n_terinov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.04.24 / Одобрена после рецензирования 08.07.24 / Принята к печати 11.07.24

Аннотация. Цель исследования – изучить сохранность, рост, производительность и состояние пихты сибирской в культурах III класса возраста в разных типах леса на территории южнотаежных лесов Среднего Урала. Объектом исследования стала пихта сибирская в 47-летних культурах, заложенных в сосняках 3 типов: ягодниково-липняковом, травяно-липняковом и разнотравном. При проведении работ руководствовались общеизвестными в лесоведении и лесоводстве методиками. Рубки ухода в культурах в последние 30 лет не осуществлялись. Установлено, что в искусственном дендроценозе сформировалось сложное по составу насаждение с высокой сомкнутостью крон. Наибольшая сохранность пихты отмечена в ягодниково-липняковом сосняке (59 %), наименьшая – в сосняке разнотравном (41 %). Запас древесины пихты составлял 99–108 м³/га. Во всех типах леса древостой представлен исключительно мелкотоварной древесиной. По достижении 3-го класса возраста культуры пихты характеризуются как успешные, т. к. по высоте соответствуют I и II классам бонитета. Деревья пихты наиболее подвержены морфологическим изменениям ствольной части в сосняке разнотравном (30 %), в сосняках травяно-липняковом и ягодниково-липняковом они менее выражены. Максимальное количество деревьев пихты с репродуктивными органами отмечено в сосняке разнотравном (94 %), где верхняя часть кроны испытывает более продолжительную инсоляцию. По среднезвешенной категории санитарного состояния (близкое к 1,0) культуры пихты сибирской относятся к насаждениям без признаков ослабления. На участке с плотным расположением большого количества деревьев пихты не исключена возможность появления различных видов болезней и насекомых, поэтому здесь необходим мониторинг. Для успешного дальнейшего роста пихты сибирской авторы рекомендуют формирование комбинированного насаждения (искусственное + естественное) из хвойных пород, которое будет устойчивым и долговечным, а с точки зрения рекреации – более эстетичным. Также вносится предложение по организации семенной базы в культурах пихты сибирской.

Ключевые слова: пихта сибирская, культуры, морфометрические показатели, запас древесины, урожайность шишек, санитарная оценка

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Ботанического сада УрО РАН (№ 123112700125-1).

Для цитирования: Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К., Теринов Н.Н. Лесоводственная оценка 47-летних культур пихты сибирской на Среднем Урале // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 92–106. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-92-106>

Original article

Silvicultural Assessment of 47-Year-Old Siberian Fir Crops in the Middle Urals

Gennadiy G. Terekhov[✉], *Doctor of Agriculture, Leading Research Scientist;*

ResearcherID: AAC-8684-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2312-9224>

Elena M. Andreeva, *Candidate of Biology, Senior Research Scientist;*

ResearcherID: AAD-3340-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

Svetlana K. Stetsenko, *Candidate of Biology, Senior Research Scientist;*

ResearcherID: AAD-2834-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-3817>

Nikolay N. Terinov, *Doctor of Agriculture, Leading Research Scientist;*

ResearcherID: N-2884-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; terekhov_g_g@mail.ru[✉], e_m_andreeva@mail.ru, stets_s@mail.ru, n_n_terinov@mail.ru

Received on April 16, 2024 / Approved after reviewing on July 8, 2024 / Accepted on July 11, 2024

Abstract. The aim of the research has been to investigate the preservation, growth, productivity and condition of Siberian fir in age class 3 crops in different forest types in the territory of the southern taiga forests of the Middle Urals. The object of the research has become Siberian fir in 47-year-old crops planted in pine forests of 3 types: berry-lime, grass-lime and mixed-grass. When carrying out the work, the researchers have been guided by well-known methods in forestry and silviculture. There have been no improvement thinning operations in the crops over the past 30 years. It has been established that an artificial dendrocenosis has formed a complex stand with a high density of crowns. The highest preservation of fir has been noted in the berry-lime pine forest (59 %); the lowest – in the mixed-grass pine forest (41 %). The fir timber stand has been equal to 99–108 m³/ha. In all types of forests, the stand is represented exclusively by small merchantable wood. Upon reaching age class 3, fir crops are characterized as successful, since their height corresponds to quality classes I and II. Fir trees are most susceptible to morphological changes in the stem part in the mixed grass pine forest (30 %), in the grass-lime and berry-lime pine forests they are less pronounced. The maximum number of fir trees with reproductive organs has been noted in the mixed-grass pine forest (94 %), where the upper part of the crown experiences longer insolation. According to the weighted average category of sanitary condition (close to 1.0), Siberian fir crops are classified as plantations without signs of weakening. In an area with a dense arrangement of a large number of fir trees, the possibility of the appearance of various types of diseases and insects cannot be ruled out, therefore monitoring is necessary here. For the successful further growth of Siberian fir, the authors recommend the formation of a combined plantation (artificial + natural) of coniferous species, which will be stable and durable, and from a recreational point of view, more aesthetically pleasing. A proposal is also being made to organize a seed base in Siberian fir forest crops.

Keywords: Siberian fir, crops, morphometric parameters, timber stand, cone yield, sanitary assessment

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment for the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (no. 123112700125-1).

For citation: Terekhov G.G., Andreeva E.M., Stetsenko S.K., Terinov N.N. Silvicultural Assessment of 47-Year-Old Siberian Fir Crops in the Middle Urals. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 92–106. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-92-106>

Введение

Пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) является важнейшей лесообразующей хвойной породой с огромным ареалом, включающим северо-восток Европейской части, Урал, Западную, Центральную и Восточную Сибирь, а также северную часть Монголии, северо-западную и северо-восточную части Китая [4]. Она покрывает около 95 % территории, занятой всеми видами пихт [6, 13]. Среди темнохвойных лесов пихта сибирская является распространенной породой, высоко проникает в горы, где выполняет важнейшие средообразующие функции и одновременно выступает в качестве сырьевого ресурса для строительной, мебельной отраслей и химической промышленности. Особенно ценится ее хвоя – источник получения эфирного масла, которое служит исходным продуктом для камфоры.

Изучением естественного возобновления, формирования и роста темнохвойных насаждений с участием пихты сибирской, а также лесоводственных мероприятий, направленных на повышение продуктивности пихтовых лесов, занимались многие исследователи [11, 13, 14, 17, 19, 20]. Однако вопрос остается рассмотренным в недостаточной степени. Так, Г.В. Крылова с коллегами отмечают: «несмотря на обширное распространение и большое народнохозяйственное значение, пихтовые леса остаются еще слабо изученными и малоизвестными широкому кругу специалистов лесного хозяйства» [9, с. 4]. Очень немногочисленны и сведения об искусственном восстановлении пихты сибирской в промышленных масштабах на землях лесного фонда [6, 21].

Площадь лесов с участием или преобладанием в составе пихты сибирской в пределах России составляет 13,6 млн га (запас древесины свыше 2 млрд м³) [10], в т. ч. на территории Уральского региона – почти 650 тыс. га. Лесные земли, покрытые пихтой сибирской в Свердловской области, по данным государственного лесного реестра на 01.01.2018 г., составляют 173,5 тыс. га (1,4 % от общей площади лесных земель), а запас ее древесины – 30,0 млн м³ (1,5 % от общего запаса насаждений) [15].

Посадочный материал пихты сибирской (далее – пихта) выращивают редко и в чрезвычайно малых количествах для озеленения населенных мест, интродукции [7] или в научных целях [6, 22]. Объемы созданных культур пихты не только на Урале, но и в России очень незначительные. Это связано с рядом факторов, в числе которых стоят проблемы (из-за сложности сбора шишек) обеспечения семенами, их очень низкой всхожести, медленного роста сеянцев в молодом возрасте, а также меньшей потребностью в древесине пихты по сравнению с другими хвойными породами [9]. Тем не менее, в учебно-опытном

лесхозе Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ, Свердловская область) существуют 47-летние культуры пихты сибирской площадью 2,5 га. Сведений о них в научной литературе очень мало, информации о динамике их роста, развития и состояния за этот период нами не обнаружено, поэтому изучение сохранности, производительности и санитарная оценка пихты сибирской в культурах являются актуальными.

Цель исследования – изучение сохранности, роста, производительности и состояния пихты сибирской в культурах 3-го класса возраста в разных типах леса на территории южнотаежных лесов Среднего Урала.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись 47-летние культуры пихты сибирской на территории лесокультурного стационара (ЛКС) в Уральском учебно-опытном лесничестве (УУОЛ) УГЛТУ. Территория лесничества расположена в южнотаежной подзоне Зауральской холмисто-предгорной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области [8]. Общая площадь ЛКС – 9,45 га, его основная часть находится в квартале 16 (выдел 15) и лишь небольшая часть – в квартале 28 (выдел 1) Паркового участкового лесничества. Данный ЛКС организован профессором, доктором сельскохозяйственных наук Н.Н. Черновым [21]. Занимает среднюю и нижнюю части склона южной экспозиции (уклон от 6 до 10°) протяженностью (сверху вниз) около 200 м, а также приречную террасу вдоль склона шириной около 140 м. Лесорастительные условия от средней до нижней трети склона соответствуют сосняку ягодниково-липняковому (С. яг.-лп), нижняя треть склона до его подошвы – сосняку травяно-липняковому (С. тр.-лп) и от подошвы склона до ручья – сосняку разнотравному (С. ртр). Всего на ЛКС представлено 29 секций, занятых сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), пихтой сибирской, елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосной кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) [21].

До рубки участие сосны в древостое по мере продвижения сверху вниз по склону уменьшалось с 7 до 4 ед. [21], остальные доли приходились на березу, липу, а в нижней части склона – еще и осину. Древостой подвергся сплошной рубке в 1971–1972 гг. От пней липы и березы обильно появилась поросль, а от осины – корневые отпрыски, которые очень сильно повреждались дикими животными. К моменту создания культур пихты (1975 г.) липа имела небольшие приросты, лиственный полог образовался в основном из березы с полнотой 0,3. На приречной террасе ранее косили сено, перед созданием ЛКС территория много лет не использовалась по назначению, после посадки пихты древесная и кустарниковая растительность долгое время не появлялась.

Преобладающая (северная) территория 8-й и 10-й секций с культурами пихты размещена в средней части склона, а небольшая (южная) часть этих секций входит в нижнюю треть склона. У 13-й и 14-й секций одна треть пространства занимает нижнюю часть склона, ближе к его основанию, а остальная (наибольшая) площадь этих 2 секций переходит от подошвы склона на надпойменную террасу (сенокосное угодье) в сторону ручья. Все 4 секции культур пихты расположены рядом и образуют единый массив площадью 2,54 га [21].

Почву обрабатывали плугом ПКЛ-70 весной 1975 г. перед посадкой поперек склона в направлении с востока на запад. Посадку культур пихты про-

водили под меч Колесова 3-летними сеянцами с открытой корневой системой. Агротехнические и лесоводственные уходы (только осветление и прочистка) выполнены своевременно. В 1989 г. проведена сплошная вырубка березы, осины и единично липы. Через 2 года (1991 г.) по центру междурядий 16-летних культур пихты посажены кедр сибирский, саженцами высотой 0,25 м, и ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb) – 3-летними сеянцами. Почву не обрабатывали, т. к. живой напочвенный покров был слабо развит. Культуры ели и кедра дополняли в 1993 г. После 1989 г. приемы рубок ухода в культурах отсутствуют.

Изучение 47-летних культур пихты осуществлено в конце августа – начале сентября 2022 г. путем закладки временных пробных площадей (ВПП) в 3 секциях (8, 13 и 14) согласно ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустroительные. Метод закладки». ВПП-1 заложена в верхней части секции 8 (средняя часть склона, уклон 7–9°), тип леса – С. яг.-лп; ВПП-2 – в северной части секции 13 (нижняя треть склона перед подошвой, уклон около 6°), тип леса – С. тр.-лп и ВПП-3 – в южной части секции 14 (от основания склона в сторону надпойменной террасы, уклон 2–3°), тип леса – С. ртр. По режиму увлажнения ВПП-1 и ВПП-2 расположены на устойчиво свежих почвах, ВПП-3 – на свежих, периодически влажных почвах. Исследование культур проведено согласно методике [12], запас древесины всех лесообразователей определен по справочнику [5], а санитарная оценка деревьев – в соответствии с Правилами санитарной безопасности в лесах (постановление Правительства РФ от 9 дек. 2020 г. № 2047). Коэффициент напряженности древостоя пихты (отношение среднего диаметра ствола на высоте 1,3 м к его средней высоте) вычислен аналогично [16].

Результаты исследования и их обсуждение

При обследовании всех секций выяснилось, что в междурядья культур пихты были посажены кедр и ель, здесь также присутствуют подрост и тонкомер деревьев и кустарников естественного происхождения. Среднее расстояние между рядами пихты на ВПП-1 и ВПП-2 – 3,4 м, в рядах – 2,0 и 2,5 м; на ВПП-3 – соответственно 3,0 и 1,7 м. Разреживание пихты в рядах при прочистке не проводили. Самая низкая сохранность пихты отмечена на ВПП-3 (табл. 1). Сухих деревьев и пней не обнаружено, возможно, в начальный период после посадки на свежих периодически влажных почвах произошел отпад саженцев, т. к. в рядах пихты есть окна, а в них были посажены ель или кедр. Общее количество деревьев лесообразователей на ВПП-1 – 1472, на ВПП-2 – 1815 и на ВПП-3 – 2059 шт./га.

Деревья пихты на всех секциях давно сомкнулись кронами в рядах. Сухих, валежных деревьев пихты и ее пней на ВПП не обнаружено. Всюду образовалось 2-ярусное насаждение с перекрытием крон вдоль рядов. В 1-м ярусе на ВПП-1 наиболее представлены лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), на ВПП-2 также доминируют естественные деревья, оставленные при прочистке – сосна обыкновенная, лиственница. На обеих ВПП пихта достигла 1-го яруса лишь в местах отсутствия затенения верхушечной части. Второй ярус состоит из ели и кедра, последующего возобновления сосны, липы, осины и угнетенных деревьев пихты.

Таблица 1

Таксационные показатели 47-летних культур пихты сибирской и сопутствующих пород лесообразователей на временных пробных площадях
 The inventory indicators of 47-year-old Siberian fir crops and associated forest-forming species in the temporary sample plots

Порода	Показатель	ВПП-1	ВПП-2	ВПП-3	
Пихта	Текущая густота, шт./га	689	804	797	
	Сохранность, %	58,6	54,7	40,7	
	Средний диаметр, см	16,1±0,61	15,4±0,76	16,5±0,67	
	Средняя высота, м	15,3±0,53	13,4±0,48	13,2±0,37	
Сосна	Средние густота, шт./га – диаметр, см – высота, м	25–10,0–9,4	103–16,0–16,8	31–3,9–5,1	
Ель		561–9,4–8,8	511–10,8–10,7	778–6,5–6,4	
Кедр		66–5,0–5,1	96–6,5–6,1	77–4,6–3,5	
Лиственница		75–13,3–16,3	154–13,2–15,7	78–2,5–5,1	
Береза		0	10–10,8–13,1	127–3,5–5,9	
Липа		56–11,2–14,1	164–2,6–4,6	33–3,9–5,1	
Ольха		0	0	202–4,2–5,5	
Осина		0	10–5,0–8,3	63–7,8–9,9	
Все деревья		Сумма площадей сечения, м ² /га	24,2	24,8	21,4
Пихта			17,9	15,1	17,3
Состав древостоя		62Пх19Е12Лц- 2К5Лп едС	60Пх18С11Е 7Лц3Лп1Б едКОс	81Пх13Е- 3Ос1Ол1Б едКЛцС	
Полнота (относительная)		0,86	0,92	0,78	
Пихта	Класс бонитета	I	II	II	
Коэффициент напряженности		1,05	1,15	1,25	

Структура древостоя на ВПП-3 несколько иная: в 1-м ярусе – пихта и небольшое число деревьев ели, посаженных в места выпавшей пихты, во 2-м ярусе – все деревья, произрастающие по междурядьям: кедр и ель, а также возобновившиеся естественным путем осина (*Populus tremula* L.), березы повислая (*Betula pendula* Roth) и пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), в небольшом количестве – липа и очень много ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench.). Кроме того, здесь по сравнению с предыдущими типами леса часто встречается ива козья (*Salix caprea* L.). Высота ее отдельных экземпляров близка к высоте пихты.

По междурядьям всех секций большое количество сухих деревьев кедра и ели, а среди живых преобладают угнетенные. Без прореживания 1-го яруса их отпад в ближайшие годы увеличится.

Состав насаждения на всех секциях сложный. Наименьшие морфометрические показатели ствола пихты отмечены в С. тр.-лп. Негативное влияние на рост многих деревьев пихты здесь оказывают деревья сосны, лиственницы и липы, оставленные после 2-го приема рубок ухода, которые в результате отсутствия конкуренции со стороны березы, удаленной при прочистке, усилили рост ствола и особенно кроны. Через 10 лет часть деревьев пихты оказалась под их пологом. Высота деревьев пихты без затенения – 19–22 м, под пологом –

в 2 раза меньше. В С. яг.-лп затенению (со стороны естественных деревьев) подверглось значительно меньшее количество пихты. Условия по режиму увлажнения почв между сосняками этих 2 типов близкие, однако из-за большего количества затененных деревьев пихты ее средняя высота оказалась в С. тр.-лп достоверно ниже ($t_{\text{факт.}} = 2,7 > t_{0,05} = 2,38$), чем в С. яг.-лп.

Распределение пихты по диапазону высот приведено на рис. 1, откуда видно, что максимальной высоты (22 м) достигли свободно растущие деревья пихты в нижней части склона – тип леса С. тр.-лп. Доля таких деревьев не превышает 5 % от общего количества.

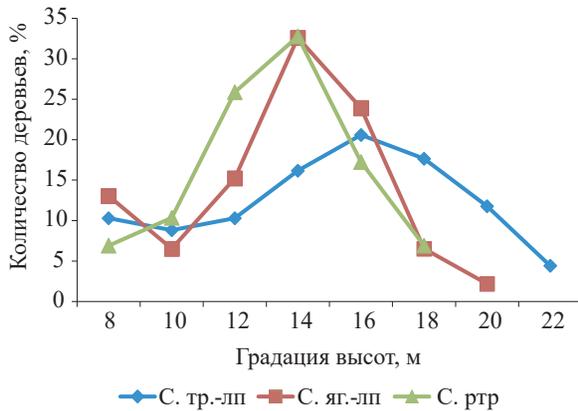


Рис. 1. Распределение деревьев пихты сибирской по градациям высот

Fig. 1. The distribution of Siberian fir trees by height gradations

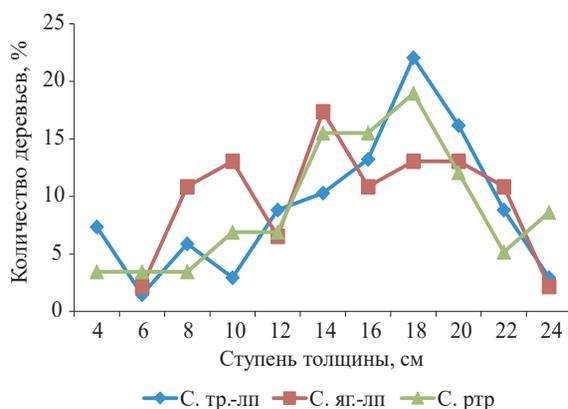
ВПП-3 расположена на бывшем, длительно существовавшем сенокосном угодье вдоль ручья (приречная терраса), в основании межгорной депрессии. В мае–июне здесь часто скапливаются холодные массы воздуха, вызывающие заморозки, которые отмечаются не только на поверхности почвы, но и в приземном слое воздуха. Плотная дернина и многолетний опад травянистой растительности, видимо, долгое время препятствовали возобновлению семенным путем древесной и кустарниковой растительности по междурядьям. Пихта без затенения подвергалась мощной инсоляции, это ускоряло начало ее фенологического развития и роста молодых побегов ствола, которые часто повреждались поздними весенними заморозками, что отрицательно сказывалось на текущем приросте верхушечного побега многих деревьев. Лишь небольшое количество (7 %) деревьев достигло высоты 18 м.

Возобновившиеся древесные породы – лиственница, сосна, осина, ольха, ива козья в С. ртр имеют разный возраст (4–21 год). Верхняя точка роста большинства из них пока не достигла вершин деревьев пихты и, находясь в междурядьях, они служат «подгоном» в росте ее ствола по высоте. Но текущий прирост по высоте у ивы значительно превышает показатель для пихты, поэтому в ближайшее время она может оказаться под пологом.

Следует отметить, что на данный момент по росту культуры пихты, находящиеся в начале 3-го класса возраста, являются успешными: в С. яг.-лп они соответствуют I классу бонитета, в 2 других типах леса – II.

Средний диаметр пихты в С. тр.-лп также был меньше, чем в С. яг.-лп, но достоверность различий по этому показателю не прослеживается. Распределение пихты по ступеням толщины в 47-летних культурах показывает (рис. 2), что доля деревьев с диаметром ствола менее 8 см в С. яг.-лп по сравнению с С. тр.-лп и С. ртр минимальная (около 2 %).

Рис. 2. Распределение деревьев пихты сибирской по ступеням толщины
Fig. 2. The distribution of Siberian fir trees by diameter classes



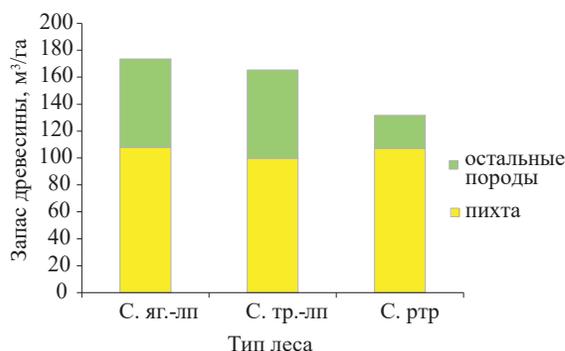
Ввиду отсутствия приемов рубок ухода в последние 3 десятилетия почти во всех типах леса по категории крупности, согласно ГОСТ 9463–2016 «Лесоматериалы круглые хвойных пород. Технические условия», преобладает группа мелких круглых лесоматериалов, на долю средних приходится не более 1/3 от общего количества, крупных нет. Сортиментная структура во всех типах леса представлена в основном пиловочником, балансами и рудничной стойкой.

Проявление внутривидовых конкурентных отношений наиболее заметно на диаметре и высоте стволов. Напряженность тем выше, чем меньше отношение среднего диаметра ствола на высоте 1,3 м к его средней высоте. Этот показатель (коэффициент) для ели, сходной по многим эколого-биологическим особенностям с пихтой, по мнению М.В. Рогозина и Г.С. Разина [16], является критерием напряженности. При соотношении меньше 0,95–1,0 древостои перегущены и перенапряжены. Средние морфометрические показатели деревьев пихты показывают, что эти коэффициенты для всех секций превышают 1,0, не позволяя считать культуры перегущенными, однако общее количество деревьев на всех ВПП высокое.

Общий запас сырораствующей древесины на исследованных секциях приведен на рис. 3, откуда видно, что в С. яг.-лп на долю пихты приходилось 62 %, в С. тр.-лп – 61 % и в С. ртр – 81 %.

Рис. 3. Запас сырораствующей древесины на секциях по типам леса

Fig. 3. The raw timber stand in the sections by forest types



Более высокий общий запас древесины в первых 2 типах леса объясняется за счет подроста, образовавшегося из предварительной (оставлен при прочистке) и последующей генераций. В последнем типе леса подрост предварительной генерации отсутствовал, а появление последующего возобновления растянуто во времени, запас его древесины пока малый. Исходя из общего запаса относительная полнота в С. яг.-лп и С. тр.-лп – по 0,9, в С. ртр – 0,8.

Морфометрические показатели кроны пихты в 47-летних культурах приведены в табл. 2. Форма кроны пихты на всех ВПП конусовидная разреженно-ярусная. Длительное затенение кроны пихты на ВПП-1 и ВПП-2 от сопутствующих деревьев предварительной и последующей генераций способствовало отмиранию большого количества нижних ветвей. На ВПП-3, где сомкнутость крон последующего возобновления невысокая, протяженность живой кроны достигает 93 % высоты ствола. Различия проекции и площади кроны между ВПП-1 и ВПП-2 незначительные, но фактическая протяженность кроны по стволу и, соответственно, объем кроны, меньше на ВПП-2.

Таблица 2

Характеристика кроны деревьев пихты на временных пробных площадях
The characteristics of the crowns of fir trees in the temporary sample plots

Показатель	ВПП-1	ВПП-2	ВПП-3
Проекция вдоль ряда, м	2,6±0,08	2,8±0,09	2,5±0,09
Проекция поперек ряда, м	3,1±0,10	3,0±0,10	2,9±0,07
Площадь проекции, м ²	6,4±0,19	6,6±0,37	5,7±0,21
Высота до живой ветви, м	2,5±0,16	2,5±0,08	1,0±0,16
Протяженность кроны, м	12,6±0,52	11,0±0,47	12,2±0,41
Доля протяженности кроны от протяженности ствола, %	82,3	82,1	93,2
Объем кроны, м ³	26,9±0,41	24,2±0,52	23,2±0,39
Сомкнутость крон	0,85	0,92	0,75
Доля дерева с шишками, %	52,0	72,4	94,2
Доля деревьев с наличием «ведьминых метел», %	10,9	4,7	0

Примечание: В таблице приведены средние значения и ошибка среднего.

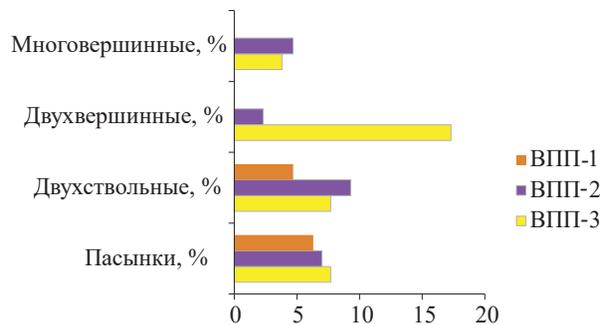
На каждой секции у пихты отмечены генеративные органы (шишки), их расположение наиболее выражено лишь на верхней части деревьев. Максимальное количество деревьев пихты с шишками зафиксировано для сосняка разнотравного (ВПП-3), где вершины пихты почти всех деревьев полностью открыты и подвержены большей инсоляции по сравнению с ВПП-1 и ВПП-2.

Под кронами пихты на ВПП-1 и ВПП-2 древесный опад занимает 95 % площади. Его мощность с каждым годом увеличивается. Подлесок и травянистая растительность присутствуют лишь в междурядьях, видовое разнообразие здесь небольшое. При этом состояние многих видов угнетенное, генеративные органы отсутствуют. На ВПП-3 видовой состав подлеска и живого напочвенного покрова значительно больше по сравнению с ВПП-1 и ВПП-2.

Морфологическое состояние стволовой части деревьев пихты на каждой ВПП было разным, пороки ствола представлены на рис. 4. Такие аномалии, как искривление ствола и образование пасынков, многовершинность, обусловлены особенностями индивидуального развития растений, возможно, действием абиотических факторов (поздние весенние заморозки, снеголом и др.) и отрицательного влияния на санитарное состояние дерева не имеют. Общая доля двух- и многовершинных (самая верхняя часть ствола, которая по своим размерам не может использоваться в качестве делового сортимента или топлива), а также двухствольных деревьев наиболее выражена (30 %) в С. ртр, в то время в С. тр.-лп их было в 2 раза меньше. Это является следствием

того, что в С. ртр культуры пихты созданы на приречной террасе с огромным открытым пространством по обе стороны от ручья. Молодые деревья в течение длительного времени оказались незащищенными лиственными или хвойными деревьями от заморозков и неоднократно подвергались их воздействию. У многих деревьев пихты произошло замещение центрального побега (ствола) и образование пасынков, 2, 3 и более вершин (в будущем стволов), что в целом уменьшает их устойчивость к воздействию абиотических факторов (бурелом, снеголом и др.) и снижает товарную структуру древостоя. Основной причиной симподиального типа строения ствола пихты в С. тр.-лп является «охлест» – механическое воздействие при резкой ветровой нагрузке ветвей деревьев, оставленных после прочистки. В результате повреждаются почки центрального побега, молодые верхушечные побеги, опадает хвоя. Лучшее состояние стволов деревьев пихты отмечено на ВПП-1.

Рис. 4. Морфологические изменения ствола пихты на пробных площадях
Fig. 4. The morphological changes of fir trunks in the sample plots



При изучении санитарного состояния ствола и кроны пихты в 47-летних культурах на ВПП погибших деревьев не выявлено, однако у отдельных деревьев отмечены повреждения коры ствола и ветвей, которые возникли по различным причинам и влияют на жизненное состояние дерева. У небольшого числа деревьев на стволовой части появились морозобойные трещины коры (рис. 5, а), сухобочины, подгары и другие пороки; на ветвях – «ведьмины метлы» (рис. 5, б). Морозобойные трещины образуются в зимний период и вызывают разрыв тканей коры и камбия.



а



б

Рис. 5. Морозобойная трещина на стволе (а) и «ведьмина метла» на ветви пихты (б)

Fig. 5. A frost crack on the trunk (а) and a “witch’s broom” on the fir branch (б)

Сухобокости возникли от механического воздействия на кору, луб, камбий и заболонные слои древесины ствола вследствие жизнедеятельности диких животных, рекреации, падения крупных спиленных деревьев. Вначале происходит отмирание древесных экзогенных тканей, пораженные участки ствола активно «засмоляются», в дальнейшем смола подсыхает и выветривается. Такие нарушения целостности поверхности коры и древесины являются местами, через которые проникают вирусы, насекомые – причина возникновения различных болезней, что в целом ведет к ослаблению жизненного состояния дерева.

На ветвях у деревьев пихты «ведьмины метлы» обнаружены лишь на ВПП-1 и ВПП-2, они располагались в нижней части кроны, на момент исследования характеризовались как преимущественно сухие. Их размеры по классификации, предложенной Е.В. Бажиной, П.И. Аминевым, [1, 2], были мелкими (до 20 см). Поражение пихты «ведьмиными метлами» может повлиять на деформацию кроны и изменчивость побегов деревьев, а также ухудшить семеношение пихты [26], в первую очередь негативно воздействуя на размеры женских шишек и качество семян [1, 18].

У единичных деревьев пихты на ВПП-1 и ВПП-2 отмечен ржавчинный рак, болезнь, вызываемая ржавчинным грибом *Melampsorella caryophyllacearui* G. Schrot. Этот гриб при полном цикле своего развития способствует появлению раковых опухолей на стволах пихты. Опухолей на исследованных деревьях пока нет, но в то же время единичные экземпляры, пораженные грибом, имеют на ветвях «ведьмины метлы».

Средневзвешенная категория санитарного состояния деревьев пихты на данный момент следующая: на ВПП-1 – 1,12; на ВПП-2 – 1,30 и на ВПП-3 – 1,03. Таким образом, исследованные культуры пихты сибирской относятся к насаждениям без признаков ослабления.

В связи с тем, что 4 секции находятся рядом и образуют единый участок с плотным расположением пихты общей площадью более 2,5 га, то могут появиться и другие виды болезней ствола, ветвей, хвои (ржавчина, бурое шютте, бактериальная водянка), при этом не исключена возможность заселения деревьев насекомыми.

Пихтовые леса на территории Южной Сибири в последние десятилетия вследствие потепления климата подвержены воздействию нескольких видов энтомовредителей, в т. ч. уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Vlandf.). Массовое воздействие инвайдеров приводит к резкой деградации лесных экосистем, снижает их биологическое разнообразие [2, 3, 17, 18, 24, 27, 36], репродуктивный потенциал [34], товарную структуру древостоя [22]. Уссурийский полиграф обнаружен на Среднем Урале [37], не исключена вероятность его внедрения в ближайшее время в культуры пихты на ЛКС, поэтому здесь необходим постоянный мониторинг и своевременные санитарные рубки ухода.

На данном этапе для снижения напряжения в культурах пихты и достижения успешности ее дальнейшего роста считаем необходимым проредить (вырубить) по междурядьям деревья естественного возобновления (береза, липа, лиственница, ива козья, ольха, осина, сосна), сохранив лишь небольшую часть перспективных деревьев ели и кедра, возможно, лиственницы и липы, в местах, где они растут свободно, имеют хороший рост и не мешают пихте. Такое смешанное комбинированное (искусственное и естественное) насаждение, состоя-

щее из разных хвойных пород, будет более устойчивым и долговечным. Также требуется проредить деревья пихты, в первую очередь вырубая отставшие в росте, которые не смогут достигнуть 1-го яруса в условиях изреженного древостоя, а также с крупными механическими повреждениями ствола.

Гибель пихты сибирской за последние 20 лет от воздействия лесных пожаров, уссурийского полиграфа и при сплошных рубках отмечается на огромных территориях. Заготовка ее семян в настоящее время становится проблемой. Имея такой уникальный участок пихты сибирской (площадь 2,54 га), необходимо срочно приступить к созданию здесь постоянного лесосеменного участка для сбора семян и закладки (сеянцами или саженцами) новых культур пихты. Также среди всей совокупности деревьев на секциях в С. яг.-лп и С. тр.-лп следует провести отбор перспективных по состоянию и росту деревьев, с которых будут получены черенки для создания клоновых культур. В целях стимуляции урожайности шишек желательна внесение минеральных удобрений в зону проекции кроны пихты.

За рубежом проблема сохранения генофонда основных лесобразующих видов решается комплексом мероприятий: платационное лесовыращивание с сочетанием классических методов селекции [23, 25], при помощи современных методов биотехнологии, таких как соматический эмбриогенез [28–33, 35].

Заключение

На секциях 47-летних культур пихты сибирской сформировалось сложное по составу насаждение с высокой густотой древостоя, поэтому в сосняках почти всех типов преобладает группа мелких круглых лесоматериалов. Лучшее состояние пихты отмечено в сосняках ягодниково-липняковом и травяно-липняковом, для них зафиксирован более высокий запас древесины. По средне-взвешенной категории санитарного состояния культуры пихты сибирской пока относятся к насаждениям без признаков ослабления.

Для дальнейшего успешного роста пихты сибирской в культурах на данном участке требуются следующие лесохозяйственные мероприятия: 1) сплошная рубка в междурядьях березы, липы, ивы козьей, ольхи, осины, сосны с сохранением небольшой части хорошо развитых ели и кедра, возможно, лиственницы, где они не мешают росту пихты; 2) прореживание отставших в росте деревьев пихты, которые не смогут достигнуть 1-го яруса, а также рубка пихты с крупными механическими повреждениями стволовой части; 3) на отдельных участках каждой секции организовать лесосеменной участок, для этого на них необходимо по междурядьям провести сплошную рубку всех деревьев, а в рядах – проредить деревья пихты (расстояние между деревьями 4–6 м), чтобы обеспечить проезд автовышек для механизированного сбора шишек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бажина Е.В., Аминев П.И. Особенности семеношения и морфология побегов деревьев пихты сибирской, пораженных ржавчинным раком // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 3. С. 7–13.

Bazhina E.V., Aminev P.A. Peculiarities Of Seed Productivity and Shoot Morphology of Fir Trees Affected by *Melampsorella Cerastii* Wint. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2007, no. 3, pp. 7–13. (In Russ.).

2. Бажина Е.В., Третьякова И.Н. К проблеме усыхания пихтовых лесов // Успехи соврем. биологии. 2001. Т. 121, № 6. С. 626–631.

Bazhina E.V., Tretyakova I.N. On the Problem of Drying Out of Fir Forests. *Uspekhi sovremennoj biologii*, 2001, vol. 121, no. 6, pp. 626–631. (In Russ.).

3. Бисирова Э.М., Кривец С.А. Динамика состояния древостоев пихты сибирской, поврежденных уссурийским полиграфом *Polygraphus proximus* Blandf. в Томской области // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2018. № 44. С. 118–140.

Bisirova E.M., Krivets S.A. Dynamics of the State of Siberian Fir Tree Stands Damaged by the Four-Eyed Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandf. in Tomsk Oblast. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2018, no. 44, pp. 118–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/44/7>

4. Бобров Е.Г. Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука, 1978. 189 с.

Bobrov E.G. *Forest-Forming Coniferous Species of the USSR*. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 189 p. (In Russ.).

5. Грошев Б.И., Синицин С.Г., Мороз П.И., Сеперович И.П. Лесотаксационный справочник. 2-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 288 с.

Groshev B.I., Sinitsin S.G., Moroz P.I., Seperovich I.P. *Forest Inventory Guide: 2nd ed., revised*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 288 p. (In Russ.).

6. Захарова А.А. Сравнительная успешность роста чистых по составу культур пихты сибирской и пихты бальзамической при их интродукции на Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2011. № 3(79). С. 30–33.

Zakharova A.A. Successful Growth of Homogeneous Siberian Fir and Balsam Fir Forest Crops Introduced in Smolensk–Moscow Highland. *Lesnoy Vestnik* = Forestry Bulletin, 2011, no. 3(79), pp. 30–33. (In Russ.).

7. Захарова А.А., Мерзленко М.Д. Рост культур пихты сибирской при ее интродукции на Смоленско-Московской возвышенности // Леса Евразии – Польские леса. М.: МГУЛ, 2009. С. 126–129.

Zakharova A.A., Merzlenko M.D. Growth Dynamics of Siberian Fir Crops in Smolensk–Moscow Highland. *Lesa Evrazii – Pol'skie lesa* = Forests of Eurasia – Polish Forests. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2009, pp. 126–129. (In Russ.).

8. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы леса Свердловской области: Практическое руководство. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Forest Growing Conditions and Forest Types of the Sverdlovsk Region: Practical Guide*. Sverdlovsk, Ural Scientific Centre of the USSR Academy of Sciences, 1973. 176 p. (In Russ.).

9. Крылов Г.В., Марадудин И.И., Михеев Н.И., Козакова Н.Ф. Пихта. М.: Агропромиздат, 1986. 238 с.

Krylov G.V., Maradudin I.I., Mikheev N.I., Kozakova N.F. *Fir*. Moscow: Agropromizdat Publ., 1986. 238 p. (In Russ.).

10. Лесная энциклопедия. Т. 2 / Гл. ред. Г.И. Воробьев. М.: Сов. энц., 1986. 631 с. *Forest Encyclopedia: vol. 2. Ed.-in-Chief G.I. Vorob'ev*. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1986. 631 p. (In Russ.).

11. Ненюков С.О. Естественное возобновление пихты сибирской в Нижегородской области // Пути повышения продуктивности лесных насаждений Нижегородской области. Нижний Новгород, 2002. С. 95–99.

Nenyukov S.O. Natural Regeneration of Siberian Fir in the Nizhny Novgorod Region. *Ways to Increase the Productivity of Forest Plantations in the Nizhny Novgorod Region*. Nizhny Novgorod, 2002, pp. 95–99. (In Russ.).

12. Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур: метод. пособ. для лесоводов. Л.: Лесн. пром-сть, 1967. 50 с.

Ogievskij V.V., Khirov A.A. *Survey and Research of Forest Crops: Methodical Manual for Foresters*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 52 p. (In Russ.).

13. Поздняков А.А. Основные типы пихтовых лесов в Кемеровской области // Уч. зап. Кемеровск. педагогич. ин-та. 1971. Вып. 21. С. 8–12.
- Pozdnyakov A.A. The Main Types of Fir Forests in the Kemerovo Region. *Uchenye zapiski Kemerovskogo pedagogicheskogo instituta*, 1971, iss. 21, pp. 8–12. (In Russ.).
14. Протопопов В.В. Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск: Наука СО, 1975. 328 с.
- Protoporov V.V. *The Environment-Forming Role of Dark Coniferous Forest*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Siberian Branch), 1975. 328 p. (In Russ.).
15. Прыдилина Н.К. Лесной сектор экономики Свердловской области: этапы развития, современное состояние и проблемы лесного планирования: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2019. 342 с.
- Pryadilina N.K. *The Forestry Sector of the Sverdlovsk Region Economy: Stages of Development, Current State and Problems of Forestry Planning*: Monograph. Yekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2019. 342 p. (In Russ.).
16. Рогозин М.В., Разин Г.С. Лесные культуры Теплоуховых в имении Строгановых на Урале: история, законы развития, селекция ели. Пермь, 2011. 192 с.
- Rogozin M.V., Razin G.S. *Teploukhovs' Forest Crops in the Stroganov Estate in the Urals: History, Laws of Development, Spruce Breeding*. Perm, 2011. 192 p. (In Russ.).
17. Савченко А.М. Возобновление пихтовых лесов. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 96 с.
- Savchenko A.M. *Regeneration of Fir Forests*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970. 96 p. (In Russ.).
18. Третьякова И.Н., Косинов Д.А. Морфоструктура кроны и урожайность пихты сибирской, поврежденной трутовиком гартига и «ведьминой метлой» // Лесоведение. 2003. № 5. С. 65–68.
- Tret'yakova I.N., Kosinov D.A. Morphological Structure and Yield of *Abies sibirica* Damaged by *Phyllinus hartigii* and *Melapsorella serastii*. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2003, no. 5, pp. 65–68. (In Russ.).
19. Фалалеев Э.Н. Пихтовые леса Сибири и их комплексное использование. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 166 с.
- Falaleev E.N. *Fir Forests of Siberia and Their Complex Use*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 166 p. (In Russ.).
20. Фалалеев Э.Н. Пихта. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 88 с.
- Falaleev E.N. *Fir*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 88 p. (In Russ.).
21. Чернов Н.Н. Опытный лесокультурный стационар // Научные и производственные объекты учебного научно-производственного комплекса лесохозяйственного предприятия: сб. информацион. материалов. Екатеринбург: УГЛТА, Опытное лесохоз. предприятие Урал. лесотехн. акад., 1995. С. 61–66.
- Chernov N.N. Experimental Forestry Station. *Scientific and Production Facilities of the Educational Research and Production Complex of the Forestry Enterprise*: Collection of Information Materials. Yekaterinburg, Ural State Forestry Engineering Academy, Experimental Forestry Enterprise of the Ural Forestry Academy Publ., 1995, pp. 61–66. (In Russ.).
22. Born W., Rauschmayer F., Bräuer I. Economic Evaluation of Biological Invasions – a Survey. *Ecological Economics*, 2005, vol. 55, iss. 3, pp. 321–336.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.08.014>
23. Carneros E., Celestino C., Klimaszewska K., Park Y.-S., Toribio M., Bonga J.M. Plant Regeneration in Stone Pine (*Pinus pinea* L.) by Somatic Embryogenesis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2009, vol. 98, pp. 165–178. <https://doi.org/10.1007/s11240-009-9549-3>
24. Debkov N.M., Aleinikov A.A., Gradel A., Bocharov A.Yu., Klimova N.V., Pudzha G.I. Impacts of the Invasive Four-Eyed Fir Bark Beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.) on Siberian Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) Forests in Southern Siberia *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 79–97.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-35>

25. Franklin J.F., Spies T.A., Pelt R.V., Carey A.B., Thornburgh D.A., Berg D.R., Lindenmayer D.B., Harmon M.E., Keeton W.S., Shaw D.C., Bible K., Chen J. Disturbances and Structural Development of Natural Forest Ecosystems with Silvicultural Implications, Using Douglas-Fir Forests as an Example. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 155, iss. 1–3, pp. 399–423. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00575-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00575-8)

26. Kamińska M., Śliwa H., Rudzińska-Langwald A. The Association of Phytoplasma with Stunting, Leaf Necrosis and Witches' Broom Symptoms in Magnolia Plants. *Journal of Phytopathology*, 2001, vol. 149, iss. 11–12, pp. 719–724. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.2001.00703.x>

27. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. Climate-Driven Conifer Mortality in Siberia. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, vol. 30, iss. 2, pp. 543–556. <https://doi.org/10.1111/geb.13243>

28. Klimaszewska K., Cyr D.R. Conifer Somatic Embryogenesis: I. Development. *Dendrobiology*, 2002, vol. 48, pp. 31–39.

29. Lelu M.A., Bastien C., Klimaszewska K., Charest P.J. An Improved Method for Somatic Plantlet Production in Hybrid Larch (*Larix x leptoeuropaea*): Part 2. Control of Germination and Plantlet Development. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 1994, vol. 36, pp. 117–127. <https://doi.org/10.1007/BF00048322>

30. Lelu-Walter M.-A., Bernier-Cardou M., Klimaszewska K. Clonal Plant Production from Self- and Cross-Pollinated Seed Families of *Pinus sylvestris* (L.) through Somatic Embryogenesis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2008, vol. 92, pp. 31–45. <https://doi.org/10.1007/s11240-007-9300-x>

31. Lelu-Walter M.-A., Pâques L.E. Simplified and Improved Somatic Embryogenesis of Hybrid Larches (*Larix x eurolepis* and *Larix x marschlinii*). Perspectives for Breeding. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, art. no. 104. <https://doi.org/10.1051/forest/2008079>

32. Nagmani R., Diner A.M., Sharma G.C. Somatic Embryogenesis in Longleaf Pine (*Pinus palustris*). *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, vol. 23, no. 5, pp. 873–876. <https://doi.org/10.1139/x93-115>

33. Niskanen A.-M., Lu J., Seitz S., Keinonen K., Weissenberg K., Pappinen A. Effect of Parent Genotype on Somatic Embryogenesis in Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Tree Physiology*, 2004, vol. 24, iss. 11, pp. 1259–1265. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.11.1259>

34. Owens J.N., Molder M. Sexual Reproduction of *Abies amabilis*. *Canadian Journal of Botany*, 1977, vol. 55, no. 21, pp. 2653–2667. <https://doi.org/10.1139/b77-303>

35. Park Y.S., Lelu-Walter M.A., Harvengt L., Trontin J.F., MacEacheron I., Klimaszewska K., Bonga J.M. Initiation of Somatic Embryogenesis in *Pinus banksiana*, *P. strobus*, *P. pinaster*, and *P. sylvestris* at Three Laboratories in Canada and France. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2006, vol. 86, pp. 87–101. <https://doi.org/10.1007/s11240-006-9101-7>

36. Poland T.M., Cullough D.G. Emerald Ash Borer: Invasion of the Urban Forest and the Threat to North America's Ash Resource. *Journal of Forestry*, 2006, vol. 104, iss. 3, pp. 118–124. <https://doi.org/10.1093/jof/104.3.118>

37. Ponomarev V.I., Tolkach O.V., Klobukov G.I., Efremenko A.A., Pashenova N.V., Demidko D.A., Kirichenko N.I., Baranchikov Yu.N. The Potential Threats Posed by the Invasive Bark Beetle *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) to a Natural Park in the Middle Urals (Russia). *Acta Biologica Sibirica*, 2024, vol. 10, pp. 661–675. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12672511>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья

УДК 630*232.216

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-107-119

**Влияние конструктивных параметров рабочих органов
лесного плуга на профиль формируемого линейного
микроравношершавости**

М.В. Драпалюк, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAP-5563-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Д.Ю. Дручинин[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [M-8473-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

М.А. Попов, преподаватель; ResearcherID: [MSY-0206-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; michael1@yandex.ru,
druchinin.denis@rambler.ru[✉], popovmaxim98@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.25 / Одобрена после рецензирования 18.04.25 / Принята к печати 21.04.25

Аннотация. Восстановление лесов в бореальных широтах является важной задачей для лесного хозяйства РФ ввиду того, что насаждения северного лесного пояса, к которым относятся таежные леса, являются глобальным климатообразующим фактором. Технология создания лесных культур на среднесуглинистых или подзолистых таежных почвах с высокой степенью увлажнения предписывает создание микроравношершавостей для дальнейшего проведения посадочных работ. Качественная обработка почвы в таких условиях нереализуема без использования эффективных технических средств. Цель исследования – оценка влияния конструктивных и технологических параметров рабочих органов предложенного лесного плуга на профиль создаваемого линейного микроравношершавости. На основе физико-математической модели перемещения почвенных масс по поверхностям рабочих органов плуга с применением специального программного комплекса выполнена серия вычислительных экспериментов по определению размерных параметров поперечного профиля микроравношершавости. Проведен базовый компьютерный эксперимент с типичными значениями входных параметров для моделирования создания лесным плугом линейных микроравношершавостей на площадях с подзолистыми почвами, имеющими высокую степень увлажнения. Далее оцениваемые входные данные были сгруппированы по принципу принадлежности к элементам модели и влияния на выходные характеристики: параметры лемешно-отвальных корпусов, дисковых рабочих органов, а также физико-механические свойства почвы. Выполнен анализ результатов моделирования по сравнению с базовым экспериментом при поочередном варьировании входных параметров модели в заданном диапазоне по отношению к базовым значениям. Установлены закономерности воздействия конструктивных и технологических параметров лемешно-отвальных корпусов, сферических дисков и характеристик почвенной среды на высоту линейного гребня. Выявлено, что наибольшее влияние на

© Драпалюк М.В., Дручинин Д.Ю., Попов М.А., 2025

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

достижение требуемой высоты микроповышения оказывают параметры плужных корпусов. Полученные результаты применимы для процедуры оптимизации параметров рабочих органов лесного плуга.

Ключевые слова: восстановление лесов, микроповышение, лесной плуг, бореальные леса, почва с переувлажнением, рабочий орган, профиль микроповышения

Для цитирования: Драпалюк М.В., Дручинин Д.Ю., Попов М.А. Влияние конструктивных параметров рабочих органов лесного плуга на профиль формируемого линейного микроповышения поверхности // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 107–119. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-107-119>

Original article

The Influence of the Design Parameters of Working Bodies of a Forest Plow on the Profile of the Formed Linear Microhill on the Surface

Mikhail V. Drapalyuk, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAP-5563-2020](https://orcid.org/0000-0002-8029-2706),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Denis Yu. Druchinin[✉], Candidate of Engineering, Assos. Prof.; ResearcherID: [M-8473-2016](https://orcid.org/0000-0003-2128-2687),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Maksim A. Popov, Lecturer; ResearcherID: [MSY-0206-2025](https://orcid.org/0009-0002-6356-5028),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; michael1@yandex.ru, druchinin.denis@rambler.ru[✉], popovmaksim98@mail.ru

Received on February 26, 2025 / Approved after reviewing on April 18, 2025 / Accepted on April 21, 2025

Abstract. The restoration of forests in boreal latitudes is an important task for forestry in the Russian Federation due to the fact that the plantations of the northern forest belt, which include taiga forests, are a global climate-forming factor. The technology of creating forest plantations on medium-loamy or podzolic taiga soils with a high degree of moistening prescribes the creation of microhills for further planting. High-quality tillage in such conditions is impossible without the use of effective technical means. The aim of the study has been to evaluate the influence of the design and technological parameters of the working bodies of the proposed forest plow on the profile of the created linear microhill. Based on a physico-mathematical model of the movement of soil masses along the surfaces of the plow's working bodies, a series of computational experiments have been performed using a special software package to determine the dimensional parameters of the transverse profile of a microhill. A basic computer experiment has been carried out with typical values of input parameters to stimulate the creation of linear microhills by a forest plow in areas with podzolic soils that have a high degree of moistening. Further, the evaluated input data have been grouped according to the principle of belonging to the elements of the model and the influence on the output characteristics: the parameters of the moldboard bodies, disk working bodies, as well as the physico-mechanical properties of the soil. The simulation results have been analyzed in comparison with the baseline experiment with alternating variation of the model input parameters in a given range relative to the baseline values. The patterns of influence of design and technological parameters of moldboard bodies, spherical disks and character-

istics of the soil environment on the height of the linear ridge have been established. It has been revealed the greatest influence on achieving the required microhill height is exerted by the parameters of the plow bodies. The results obtained are applicable to the procedure of optimizing the parameters of the working bodies of a forest plow.

Keywords: reforestation, microhill, forest plow, boreal forests, water-logged soil, working body, microhill profile

For citation: Drapalyuk M.V., Druchinin D.Yu., Popov M.A. The Influence of the Design Parameters of Working Bodies of a Forest Plow on the Profile of the Formed Linear Microhill on the Surface. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 107–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-107-119>

Введение

В настоящее время учеными все чаще фиксируются негативные тенденции изменения климата на нашей планете. Мировым сообществом принимается комплекс мер различного характера, одним из важнейших направлений среди них является охрана и развитие лесных экосистем, оказывающих влияние на глобальные климатические условия. Бореальные леса, входящие в так называемый северный лесной пояс, обладают наибольшим климатообразующим потенциалом среди лесных ресурсов мира, т. к. поглощают из атмосферы Земли до 17 % углекислого газа, повышение концентрации которого ведет к ее разогреву [3, 14].

Вследствие того, что значительные таежные территории ежегодно уничтожаются природными возгораниями и большая часть бореальных лесов охвачена хозяйственной деятельностью человека [24], существует тенденция к уменьшению площади северного лесного пояса [10, 23].

Международная группа исследователей в работе [17] отмечает тот факт, что в последнее время в лесах бореальных широт участились антропогенные нарушения, а существующие методы управления не позволяют сохранить эти леса в полном объеме. Необходим поиск новых инструментов для сохранения бореального лесного покрова.

Значительная площадь бореального лесного сообщества приходится на территорию РФ, поэтому для лесного хозяйства нашей страны недопущение деградации и своевременное восстановление лесных насаждений субарктической и умеренной климатических зон являются одними из важных направлений деятельности.

Восстановление лесных массивов на подобных площадях относится к наиболее трудоемким работам в лесном хозяйстве, т. к. почвенный фон здесь часто имеет временное или избыточное переувлажнение [1]. В результате технологические требования к лесовосстановлению на подзолистых северных почвах предписывают создание микроповышений с дальнейшей посадкой в них лесных культур [19]. Подготавливаемые линейные гряды для обеспечения аэрации почвенной среды с целью снижения ее влажности должны иметь высоту не менее 20 см и ширину от 0,5 м [2].

Исследованиям в области улучшения продуктивности бореальных лесов посвящены работы А.М. Тараканова, Е.Н. Наквасиной, М.Д. Мерзленко, А.И. Соколова, О.П. Шепелевой и др. [8, 11].

Вопросы обработки лесной почвы в бореальных широтах рассматривают В.И. Казаков, Н.Е. Проказин, А.С. Ильинцев, А.Ф. Алябьев, А.М. Цыпук, А.В. Родионов, M. Löf, U. Sikström, L. Bedford, G. Örlander [6, 9, 15, 21–23]. Ученые анализируют различные способы предпосадочной подготовки почвы и отмечают, что создание благоприятных условий для укоренения саженцев и, как следствие, повышения эффективности процедуры лесовосстановления в целом невозможны без механической подготовки почвы перед посадкой на восстанавливаемом участке [16, 18]. Приживаемость и последующее развитие саженцев улучшаются за счет удаления верхнего слоя органической почвы и обнажения нижних почвенных слоев с образованием линейных или дискретных микроповышений из смеси органических веществ и минеральной почвы [23].

М.Д. Мерзленко [11] подчеркивает важность обеспечения высокого уровня агротехнического фона на этапе закладки лесных культур с унификацией параметров посадочного материала применительно к лесорастительным условиям восстанавливаемых площадей.

А.С. Ильинцев с соавт. [7] указывают на то, что в условиях Европейского Севера России наблюдается переизбыток атмосферной и почвенной влаги и при неверном выборе технологии обработки почвы может происходить вымокание семян.

Возможность получения в долгосрочной перспективе продуктивных лесных насаждений за счет механического предпосадочного воздействия на почву доказана по результатам исследований К. Johansson с соавт. [20].

Повышение производительности и качества, а также снижение себестоимости почвообработки в тяжелых лесных условиях нереализуемы без использования эффективных технических средств.

Микроповышения, создаваемых серийными лесными плугами ПЛМ-1,3, ПДВ-1,5 или ПШ-1, часто не соответствуют технологическому регламенту подготовки почвы по размерным характеристикам или плотности, что требует поиска новых технических и компоновочно-технологических решений в вопросе подготовки почвы на переувлажненных лесных участках.

Цель данной работы – оценка влияния конструктивных и технологических параметров рабочих органов предлагаемого лесного плуга на профиль создаваемого линейного микроповышения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является конструкция лесного плуга для образования линейных микроповышений. Особенность разработанного орудия заключается в наличии 2 свальных рабочих секций, в каждой из которых в качестве рабочих органов объединены лемешно-отвальный корпус и сферический диск. Их совместная работа позволяет обеспечивать равномерную укладку почвенных пластов в центр необработанной полосы, где формируется гребень [4]. Плужные корпуса при этом подрезают пласт и оборачивают его, после чего почвенные массы сходят на сферические диски, которые, работая по принципу бермоочистителя, дооборачивают пласты и сдвигают их для укладки в микроповышение (рис. 1). Назначение расположенного в задней части плуга катка – уплотнение и окончательное формирование профиля микроповышения.

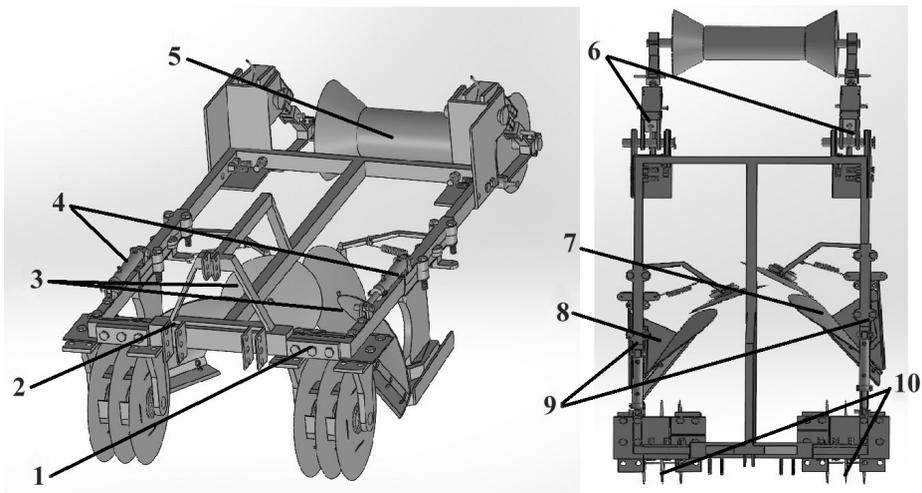


Рис. 1. Общий вид лесного плуга для образования микроповышений: 1 – рама; 2 – навеска; 3 – сферические диски; 4 – гидроцилиндры; 5 – уплотняющий каток; 6 – пружины; 7, 8 – левооборачивающий и правооборачивающий лемешные корпуса соответственно; 9 – подвижные брусья; 10 – ножевые батареи

Fig. 1. A general view of a forest plow for the formation of microhills: 1 – frame; 2 – hitch; 3 – spherical discs; 4 – hydraulic cylinders; 5 – sealing roller; 6 – springs; 7, 8 – left-turning and right-turning mouldboard bodies, respectively; 9 – movable bars; 10 – knife batteries

Ранее авторами для моделирования влияния параметров конструкции лемешно-отвалных корпусов и сферических дисков на процесс формирования микроповышения лесным плугом была разработана физико-математическая модель перемещения почвы по поверхностям рабочих органов [5].

Для реализации модели и проведения компьютерных исследований создан программный продукт, позволяющий варьировать входные независимые переменные, к которым относятся параметры рабочих органов лесного плуга, почвы и общие параметры агрегата [13]. В число основных выходных параметров моделирования входят высота микроповышения h , отсчитываемая от уровня поверхности почвы, и расстояние между вершинами холмиков укладываемых пластов L_m . При этом поперечный профиль гребня строится без учета глубины хода корпуса плуга.

Основным результатом вычислительных экспериментов является зависимость размерных параметров формируемого микроповышения в виде графика его поперечного профиля от соотношения заданных конструктивных и технологических параметров лесного плуга и свойств почвы.

Теоретическое исследование влияния параметров рабочих органов лесного плуга на профиль создаваемого микроповышения основано на методе так называемого базового эксперимента с поочередным изменением входных параметров модели F_i для оценки их влияния на выходные характеристики и построения закономерностей вида $h(F_i)$.

Первоначально реализованный базовый эксперимент включал наиболее типичные значения выбранных параметров. При этом входные модельные параметры обрабатываемой среды определялись с учетом факта эксплуатации орудия для создания линейных микроповышений на площадях с переувлажненными подзолистыми почвами (см. таблицу).

Параметры базового вычислительного эксперимента
The parameters of the basic computational experiment

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Глубина хода лемешного корпуса	–	250	Миллиметр
Угол между отвалом и стенкой борозды	θ	15	Градус
Ширина захвата корпуса	b	350	Миллиметр
Угол наклона лемеха ко дну борозды	–	20	Градус
Масса рабочей секции	–	150	Килограмм
Диаметр сферического диска	D	610	Миллиметр
Угол атаки сферического диска	α_d	45	Градус
Угол вертикального наклона диска	β_d	0	
Центральный угол дуги окружности сферического диска	φ_d	25	
Угол заострения кромки диска	i	15	
Задний угол резания	–	5	
Влажность почвы	–	54	Процент
Плотность почвы	–	0,98	Грамм на 1 см ³
Коэффициент трения	–	0,6	–
Липкость почвы	–	0,05	–
Расстояние между рабочими секциями	ΔS	1,4	Метр
Скорость агрегата	–	5	Километров в час
КПД трактора	–	0,98	–

Составление программы исследования было реализовано по принципу группирования значимых параметров модели, варьируемых в процессе реализации вычислительных экспериментов, с основными элементами конструкции лесного плуга:

параметры лемешных корпусов лесного плуга (угол между отвалом и стенкой борозды и ширина захвата корпуса);

параметры компоновки орудия (расстояние между рабочими секциями).

параметры сферических дисков (диаметр, угол атаки, угол вертикального наклона диска, центральный угол дуги окружности).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты базового вычислительного эксперимента по построению поперечного профиля микроповышения без учета глубины хода корпуса плуга приведены на рис. 2.

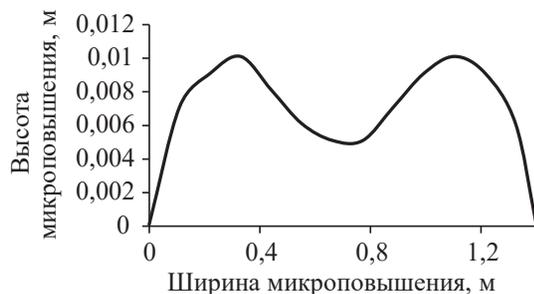


Рис. 2. Зависимость между высотой и шириной микроповышения для входных параметров базового компьютерного эксперимента

Fig. 2. The relationship between the height and width of the microhill for the input parameters of the basic computer experiment

Полученные результаты подтвердили планируемый функционал составленной физико-математической модели работы лесного плуга. Реализация ба-

зового вычислительного эксперимента показала, что формирование цельной поверхности микроповышения уплотняющим катком для поперечного расстояния между рабочими секциями $\Delta S = 1,4$ м усложняется вследствие укладки почвенных масс в 2 отдельных почвенных холмика с вершинами на расстоянии $L_m = 0,75$ м. Максимальная высота 2 гребней, образующихся после схода пластов со сферических дисков, равняется 10 см. Ширина микроповышения составляет примерно 1,4 м, т. е. фактически соответствует поперечному расстоянию ΔS между рабочими секциями.

Далее оценивали изменения результатов моделирования по сравнению с базовым экспериментом при варьировании входных модельных параметров в диапазоне вблизи базовых значений.

Каждый выбранный параметр изменялся по 5 уровням в пределах интервала $[F_{i\min}, F_{i\max}]$ с шагом ΔF_i , при этом другие базовые характеристики рабочего процесса оставались прежними.

Первоначально было изучено влияние параметров лемешного корпуса как основного рабочего органа лесного плуга на процесс образования микроповышения. Оказывая механическое воздействие на почву, он подрезает ее пласт, оборачивает его и направляет на сферические диски.

Для выявления связи угла между отвалом и стенкой борозды и высотой образуемого гребня проведена серия вычислительных экспериментов. Обнаружено, что вследствие увеличения площади рабочей поверхности корпусов за счет изменения угла в диапазоне $30 \dots 45^\circ$ с шагом 5° возрастает объем задействованной для образования гребня почвы (рис. 3, а). При постоянном значении $\Delta S 1,4$ м это приводит к увеличению высоты образуемого микроповышения от 8 до 11 см (по вершинам гребней) и от 5 до 7 см (по центральной части микроповышения).

Серия экспериментов для установления зависимости ширины захвата корпуса и высоты микроповышения при постоянном расстоянии между рабочими секциями (1,4 м) подразумевала варьирование b в диапазоне $300 \dots 450$ мм с шагом 50 мм (рис. 3, б). Расчетная высота h изменялась от 8 до 12 см (по вершинам микроповышения) и в пределах от 5 до 7 см (по центральной части гребня), что позволило сделать вывод о прямопропорциональности зависимости изменения высоты микроповышения от величины захвата корпуса.

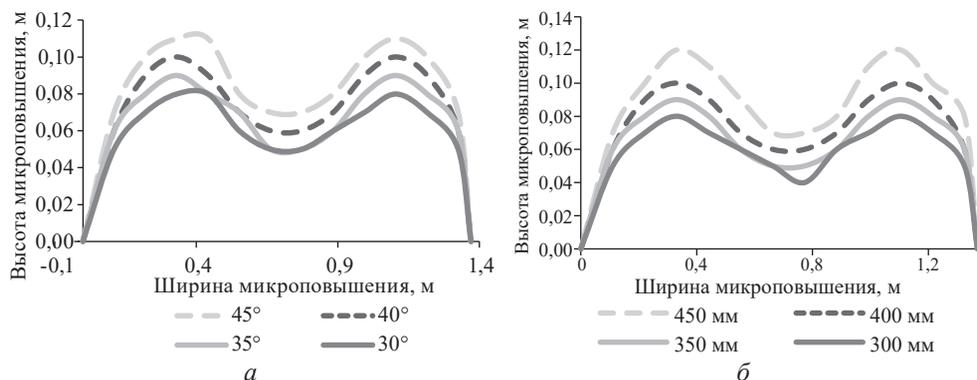


Рис. 3. Зависимость высоты микроповышения от величины угла θ (а) и от ширины захвата корпуса (б)

Fig. 3. The dependence of the microhill height on the value of the angle θ (a) and on the grip width of the body (б)

Для нахождения оптимального расстояния между рабочими секциями в расчетах этот параметр варьировался в пределах от 1 до 1,8 м. При анализе установленных закономерностей влияния расстояния ΔS на высоту h выявлена обратная зависимость между данными параметрами. Максимальная высота микроповышения, равная 23 см, достигается при расстоянии $\Delta S = 1$ м (рис. 4, *a*). При этом образуется однородный гребень без отдельных холмиков от сходящих с дисков пластов.

Резкое уменьшение высоты профиля микроповышения (до 12 см) с наличием 2 гребней с впадиной по его центру наблюдается при дальнейшем увеличении ΔS до 1,26 м (рис. 4, *б*). Увеличение параметра ΔS до максимальных значений из интервала варьирования приводит к плавному уменьшению высоты микроповышения h по вершинам гребней от 10 см (при $\Delta S = 1,4$ м) до 7 см (при $\Delta S = 1,8$ м) и образованию четких контуров двух гребней (рис. 4, *в*).

По итогам серии экспериментов установлено, что при увеличении ширины микроповышения расстояние между укладываемыми пластинами становится больше, а значит, цельный профиль гряды не образуется.

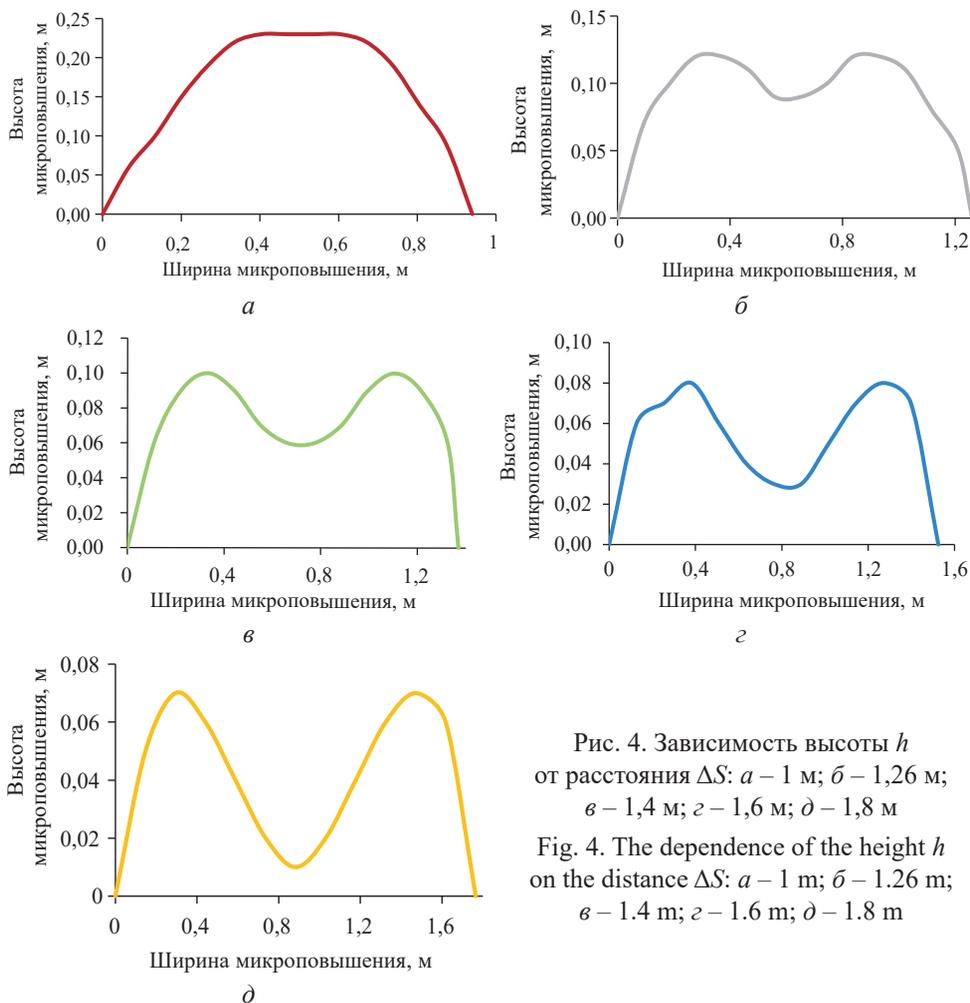


Рис. 4. Зависимость высоты h от расстояния ΔS : *a* – 1 м; *б* – 1,26 м; *в* – 1,4 м; *г* – 1,6 м; *д* – 1,8 м
Fig. 4. The dependence of the height h on the distance ΔS : *a* – 1 м; *б* – 1.26 м; *в* – 1.4 м; *г* – 1.6 м; *д* – 1.8 м

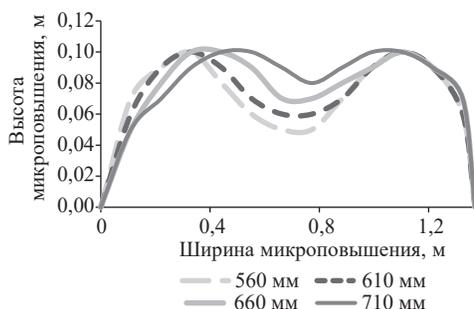
Характер влияния параметров сферического диска на процесс функционирования почвообрабатывающих орудий исследован П.С. Нартовым [12].

Однако для оценки степени этого влияния требуются дополнительные научные изыскания вследствие того, что сферический диск в составе рабочей секции орудия непосредственно не подрезает почвенный пласт, а, располагаясь после лемешного корпуса, лишь направляет его к центру создаваемого микроповышения.

Для выявления закономерностей между диаметром сферического диска, функционирующего совместно с лемешным корпусом, и высотой образуемого гребня проведена серия вычислительных экспериментов. Задаваемые в качестве модельных параметров диаметры дисков – стандартные. Диапазон варьирования – 560...710 мм с шагом 50 мм (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость высоты микроповышения от диаметра сферического диска

Fig. 5. The dependence of the microhill height on the diameter of the spherical disk



При увеличении радиуса сферического диска установлено явное возрастание поперечного сдвига почвы, т. к. после схода с отвала корпуса почвенные массы перемещаются к оси диска, а уже потом в направлении центра микроповышения. Это подтверждают полученные результаты: при неизменной ширине $\Delta S = 1,4$ м высота образуемого микроповышения в пределах вершин не изменяется и для всех выбранных значений D составляет 10 см, при этом h в центральной части гребня варьирует в пределах от 5 до 8 см.

Угол атаки и угол наклона в вертикальной плоскости – основные технологические параметры сферических дисков, непосредственно влияющие на результат рабочего процесса. Серия компьютерных расчетов поперечного профиля гряды позволила установить взаимосвязь между углами расположения диска α_d и β_d и высотой микроповышения. В экспериментах α_d варьировался от 45° до 60° с шагом 5° . Угол β_d изменялся от -15° до 15° : отрицательным угол β_d считается, когда диск наклонен к стойке, а положительным – когда диск завален в противоположную сторону.

Результаты экспериментов показывают минимальные различия в высоте h по вершинам образуемой гряды ($h = 10$ см) с увеличением угла атаки α_d при неизменных объеме перемещаемой почвы и ширине ΔS . Варьирование высоты в пределах от 5 до 7 см наблюдается лишь по центру микроповышения, что свидетельствует о формировании его более однородного профиля (рис. 6, а).

Представленные на рис. 6, б зависимости высоты микроповышения от различных углов наклона β_d показывают отсутствие изменений h на всем заданном диапазоне варьирования угла β_d : высота находится в пределах 10 см. Высота h , замеряемая по центру гребня, изменяется в пределах 4...8 см. Установлено, что размещение дисковых рабочих органов под положительными углами β_d позволяет добиться большего поперечного смещения почвы и сформировать цельный профиль микроповышения.

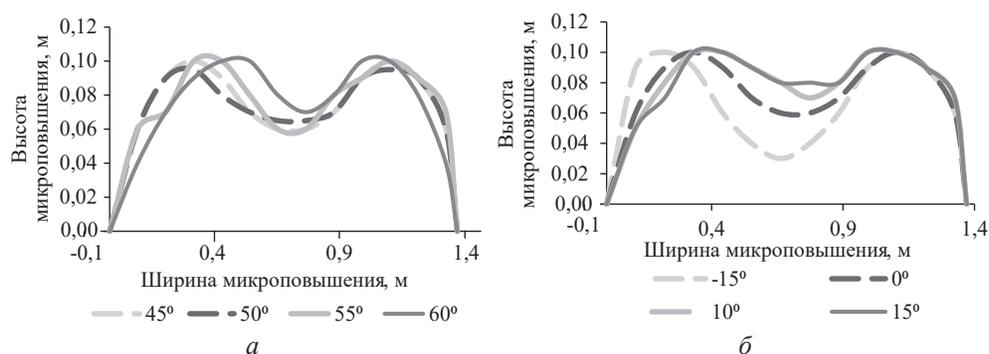


Рис. 6. Зависимость высоты микроповышения от угла атаки (а) и угла наклона (б) диска

Fig. 6. The dependence of the microhill height on the angle of attack (a) and the angle of inclination (b) of the disk

Угол φ_d образуется в результате сечения диска экваториальной плоскостью. Лесной плуг при создании микроповышения воздействует на почву по принципу отвальной обработки, с учетом чего угол схода пласта почвы с поверхности диска с его последующей укладкой на необработанную поверхность (т. е. сумма углов α_d и φ_d) не должен превышать 55...60° [12]. В экспериментах с моделью угол φ_d варьировался от 25° до 40°. Анализ полученных зависимостей угла φ_d от высоты микроповышения показал, что при увеличении угла φ_d не происходит существенного изменения высоты h , которая находится в пределах 10 см (рис. 7).

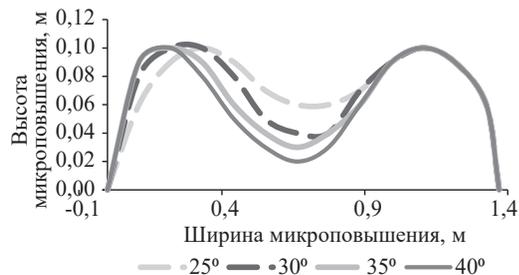


Рис. 7. Зависимость высоты микроповышения от величины центрального угла дуги окружности диска φ_d

Fig. 7. The dependence of the height of the microhill on the magnitude of the central angle of the arc of the disk φ_d

Выводы

1. Проведенные теоретические исследования в виде вычислительных экспериментов по расчету размеров поперечного профиля микроповышения показали, что на высоту образуемого гребня значительное влияние оказывают параметры корпуса, а именно угол между отвалом и стенкой борозды и ширина захвата лемешно-отвального корпуса. При этом установлена преобладающая степень влияния ширины захвата на высоту гребня вследствие непосредственного воздействия данного параметра на объем подрезаемой и оборачиваемой почвы, задействуемой впоследствии для образования микроповышения.

2. Расстояние между рабочими секциями лесного плуга, формируя ширину создаваемого микроповышения, непосредственно влияет и на высоту гребня: с уменьшением данного параметра происходит увеличение его высоты. При распределении подрезаемого и оборачиваемого рабочими органами объема почвы на меньшую ширину (около 1 м) наблюдается образование единого гребня. Увеличение ширины гребня ухудшает условия работы уплотняющего катка при

создании качественного микроповышения в виде цельного уплотненного массива почвы.

3. Выявленные закономерности показывают отсутствие существенного влияния параметров дисковых рабочих органов на высоту линейного гребня. В то же время установлено, что от параметров дисков в значительной мере зависит расстояние между вершинами холмиков 2 почвенных пластов, формирующих профиль микроповышения: при использовании дисков большего диаметра пласты укладываются ближе друг к другу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляев В.В. Восстановление лесов Европейского Севера России: Эколого-лесохозяйственные аспекты. Архангельск: Помор. ун-т, 2011. 325 с.

Belyaev V.V. *Restoration of Forests in the European North of Russia: Ecological and Forestry Aspects*. Arkhangelsk, Pomor State University, 2011. 325 p. (In Russ.).

2. Винокуров В.Н., Силаев Г.В. Лесохозяйственные машины и их применение: тексты лекций. М.: МГУЛ, 1999. 234 с.

Vinokurov V.N., Silaev G.V. *Forestry Machines and Their Applications: Lecture Texts*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 1999. 234 p. (In Russ.).

3. Готье С., Бернье П., Куулувайнен Т., Швиденко А., Щепашченко Д. Бореальные леса и глобальные изменения // Уст. лесопользование. 2016. № 2(46). С. 2–7.

Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A., Shchepashchenko D. Boreal Forests and Global Change. *Ustojchivoe lesopol'zovanie = Sustainable Forest Management*, 2016, no. 2(46), pp. 2–7. (In Russ.).

4. Дручинин Д.Ю., Попов М.А. К вопросу создания микроповышений при проведении лесовосстановления в условиях временно переувлажняемых почв // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 48–53.

Druchinin D.Yu., Popov M.A. On the Issue of Creating Microhills during Reforestation in Conditions of Temporarily Waterlogged Soils. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference*. Vologda, Vologda State University Publ., 2021, pp. 48–53. (In Russ.).

5. Дручинин Д.Ю., Камалова Н.С., Попов М.А. Формализованная модель перемещения почвы по поверхностям рабочих органов лесного плуга для образования микроповышений // Изв. СПбГЛТА. 2023. № 245. С. 200–214.

Druchinin D.Yu., Kamalova N.S., Popov M.A. A Formalized Model of Soil Movement on the Surfaces of the Working Bodies of a Forest Plow for the Formation of Microhill. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, no. 245, pp. 200–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.200-214>

6. Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 2. С. 5–16.

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P., Paramonov A.A. Forest Crops at Spot Mounds after Excavator Soil Cultivation. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-2-5-16>

7. Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П. Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 52–64.

Ilintsev A.S., Romanov E.M., Voronin V.V., Bogdanov A.P. Modern Practice of Artificial Reforestation in the Taiga Zone of the European Part of Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 52–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-52-64>

8. Ильинцев А.С., Романов Е.М., Наквасина Е.Н., Богданов А.П. Влияние параметров агротехнических мероприятий при лесовосстановлении на свойства почвы в условиях Европейского Севера России // Инженеры России и Беларуси: сила в сотрудничестве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2024. С. 91–94.

Ilintsev A.S., Romanov E.M., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P. The Influence of Agrotechnical Measures Parameters during Forest Restoration on Soil Properties in the Conditions of the European North of Russia. *Inzheneriy Rossii I Belarusi: sila v sotrudnichestve: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Arkhangel'sk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2024, pp. 91–94. (In Russ.).

9. Казаков В.И., Проказин Н.Е., Лобанова Е.Н. Особенности создания и роста культур ели на вырубках с влажными и временно переувлажненными почвами // Лесотехн. журн. 2013. № 1(9). С. 32–42.

Kazakov V.I., Prokazin N.E., Lobanova E.N. Features of the Creation and Growth of Spruce Crops in Clearings with Moist and Temporarily Waterlogged Soils. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2013, no. 1(9), pp. 32–42. (In Russ.).

10. Луганский Н.А., Азаренок В.А., Залесов С.В., Луганский В.Н., Исаева Р.П., Терехов Г.Г., Фрейберг И.А. Основные технические направления совершенствования лесовосстановления и лесообразования // Леса России и хозяйство в них. 2008. № 2(30). С. 1–18.

Lougansky N.A., Azarenok V.A., Zalesov S.V., Lougansky V.N., Isaeva R.P., Terekhov G.G., Freiberg I.A. The Main Technical Trends to Improve Reforestation and Forest Formation. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih = Forests of Russia and the Economy in Them*, 2008, no. 2(30), pp. 1–18. (In Russ.).

11. Мерзленко М.Д. Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 22–30.

Merzlenko M.D. Relevant Aspects of Artificial Reforestation. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 3, pp. 22–30. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.22>

12. Нартов П.С. Дисковые почвообрабатывающие орудия. Воронеж: ВГУ, 1972. 184 с.

Nartov P.S. *Disk Tillage Implements*. Voronezh, Voronezh State University Publ., 1972. 184 p. (In Russ.).

13. Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023680553 РФ. Программный комплекс для моделирования профиля микроповышения, образуемого на вырубках с временным переувлажнением почвы при работе лесного плуга: № 2023680048: заявл. 03.10.2023: опубли. 03.10.2023 / Д.Ю. Дручинин, Н.С. Камалова, М.А. Попов.

Druchinin D.Yu., Kamalova N.S., Popov M.A. *A Software Package for Modeling the Profile of Microhill Formed in Cuttings with Temporary Waterlogging of the Soil during the Operation of a Forest Plow*. Certificate RF of State Registration of a Computer Program, no. 2023680553, 2023.

14. Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесхоз. информ. 2020. № 1. С. 92–114.

Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Zolina T.A., Yugov A.N. The Boreal Forest of Russia: Opportunities for the Effects of Climate Change Mitigation. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2020, no. 1, pp. 92–114. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10>

15. Цытук А.М., Родионов А.В., Пекки Л.П. Перспективные машины для дискретной подготовки почвы под лесные культуры // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2020. № 56. С. 90–93.

Tsybouk A.M., Rodionov A.V., Pekki L.P. Perspective Machines for Discrete Soil Preparation for Artificial Reforestation. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2020, no. 56, pp. 90–93. (In Russ.).

16. Bedford L., Sutton R.F. Site Preparation for Establishing Lodgepole Pine in the Sub-Boreal Spruce Zone of Interior British Columbia: the Bednesti Trial, 10-Year Results. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 126, iss. 2, pp. 227–238. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00090-0)

17. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G., Sodhi N.S. Urgent Preservation of Boreal Carbon Stocks and Biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, vol. 24, iss. 10, pp. 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.019>

18. Chantal de M., Leinonen K., Ilvesniemi H., Westman C.J. Combined Effects of Site Preparation, Soil Properties, and Sowing Date on the Establishment of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* from Seeds. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 5, pp. 931–945. <https://doi.org/10.1139/x03-011>

19. Hallsby G., Örlander G. A Comparison of Mounding and Inverting to Establish Norway Spruce on Podzolic Soils in Sweden. *Forestry*, 2004, vol. 77, iss. 2, pp. 107–117. <https://doi.org/10.1093/forestry/77.2.107>

20. Johansson K., Nilsson U., Örlander G. A Comparison of Long-Term Effects of Scarification Methods on the Establishment of Norway Spruce. *Forestry*, 2013, vol. 86, iss. 1, pp. 91–98. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps062>

21. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>

22. Örlander G., Nordborg F., Gemmel P. Effects of Complete Deep-Soil Cultivation on Initial Forest Stand Development. *Studia Forestalia Suecica*, 2002, no. 213. 20 p.

23. Sikström U., Hjelm K., Holt Hanssen K., Saksa T., Wallertz K. Influence of Mechanical Site Preparation on Regeneration Success of Planted Conifers in Clearcuts in Fennoscandia – a Review. *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, no. 2, art. no. 10172. <https://doi.org/10.14214/sf.10172>

24. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S.A., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Piltsev A., Hou Y. Forest Harvesting and Hydrology in Boreal Forests: Under an Increased and Cumulative Disturbance Context. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 522, art. no. 120468. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120468>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-120-132

Работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на многолетней мерзлоте

В.Я. Шапиро¹, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-9658-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

О.А. Куницкая², *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-9568-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

В.А. Каляшов³, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: ABA-9692-2021*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

И.С. Должиков³, *канд. техн. наук*; *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>*

В.П. Друзьянова⁴, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAG-2463-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

Е.А. Тихонов⁵, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: E-9342-2014*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; shapiro54vlad@mail.ru

²Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; ola.ola07@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru

⁵Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; tihonov@petsru.ru

Поступила в редакцию 17.11.24 / Одобрена после рецензирования 03.02.25 / Принята к печати 06.02.25

Аннотация. Площадь, занимаемая многолетней мерзлотой в Российской Федерации, составляет более 10 млн км², или свыше 60 % всей территории страны. Многолетняя мерзлота в Сибири и на Дальнем Востоке заходит далеко на юг и распространяется более чем на 30 % лесопокрытых земель страны. Произрастающие здесь лесные насаждения относятся к хвойным бореальным, в которых сосредоточены большие запасы ценных спелых и перестойных лесов. Их значительная часть располагается на сильно пересеченной местности, относимой к крутым и очень крутым склонам. В качестве примера можно привести южную Якутию, характеризующуюся большими запасами спелых и перестойных насаждений, при этом находящихся на склонах Верхоянского хребта, Алданского нагорья и т. д. Нормативная документация в области лесопользования запрещает разработку лесосек на многолетней мерзлоте в теплый период года. Но помимо основных лесосечных работ в лесных насаждениях необходимо выполнять различные лесохозяйственные мероприятия (уходы, санитарные, противопожарные), а также очистку лесосек и т. д., которые проводятся только в бесснежный период с использованием лесных машин. В этой связи возникает потребность в поиске модели поддержки принятия организационно-технологических решений по размещению

и эксплуатации первичных транспортных путей в таких природно-производственных условиях с целью минимизации негативного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты. При этом следует учитывать, что, несмотря на общие условия многолетней мерзлоты, геотехнические факторы склонов могут достаточно существенно различаться. Прежде всего это связано с наклоном плоскости склона к линии горизонта, влажностью почвогрунта, наклоном плоскости анизотропии и дилатансии почвогрунта к плоскости склона. Представлены результаты теоретического анализа влияния геотехнических факторов и параметров лесной машины на степень воздействия ее движителя на почвогрунты лесосек на склонах.

Ключевые слова: леса на склонах, леса на многолетней мерзлоте, колееобразование, трелевка, разработка горных лесосек, работоспособность трелевочных волоков

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», за счет гранта РФФИ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Для цитирования: Шапиро В.Я., Куницкая О.А., Каляшов В.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П., Тихонов Е.А. Работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на многолетней мерзлоте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 120–132. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-120-132>

Original article

Operability of Skidding Trails and Technological Corridors on Permafrost

*Vladimir Ya. Shapiro*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

*Olga A. Kunitskaya*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

*Vitalii A. Kalyashov*³, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

*Ilya S. Dolzhikov*³✉, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

*Varvara P. Druzyanova*⁴, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

*Evgeny A. Tikhonov*⁵, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-9342-2014](https://orcid.org/0000-0003-2136-3268), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, per. Institut'skiy, 5, Saint Petersburg, 191014, Russian Federation; shapiro54vlad@mail.ru

²Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; ola.ola07@mail.ru

³Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru✉

⁴North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; druzvar@mail.ru

⁵Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; tikhonov@petsu.ru

Received on November 17, 2024 / Approved after reviewing on February 3, 2025 / Accepted on February 6, 2025

Abstract. The area occupied by permafrost in the Russian Federation is more than 10 million km², or over 60 % of the entire territory of the country. Permafrost in Siberia and the Far East extends far to the south, and spreads over more than 30 % of the forested lands of our country. The forest plantations growing here belong to the boreal coniferous forests, which contain large reserves of valuable mature and overmature forests. A significant portion of them is located on highly rugged terrain, classified as steep and very steep slopes. As an example, southern Yakutia is characterized by large reserves of mature and overmature plantations, while located on the slopes of the Verkhojansk Ridge, the Aldan Highlands, etc. The regulatory documentation in the field of forest management prohibits the development of cutting areas on permafrost during the warm season. But in addition to the basic logging operations in forest plantations, it is necessary to carry out various forestry activities (maintenance, sanitary, fire-preventive), as well as clearing of cutting areas, etc., which are performed only during the snow-free period using forestry machinery. In this regard, there is a need to find a model to support the adoption of organizational and technological decisions on the placement and operation of primary transport routes in such natural and industrial conditions in order to minimize the negative impact of forestry machinery propellers on soils. It should be taken into account that, despite the general conditions of permafrost, the geotechnical factors of the slopes can vary quite significantly. First of all, this is associated with the inclination of the slope plane to the horizon line, the moisture content of the soil, the inclination of the anisotropy plane and the dilatancy of the soil to the slope plane. The results of theoretical analysis of the influence of geotechnical factors and parameters of a forestry machine on the degree of impact of its propeller on the soils of cutting areas on the slopes are presented.

Keywords: forests on the slopes, forests on permafrost, rutting, skidding, development of mountain cutting areas, efficiency of skidding trails

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative Developments in the Field of Logging Industry and Forestry” at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Shapiro V.Ya., Kunitskaya O.A., Kalyashov V.A., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P., Tikhonov E.A. Operability of Skidding Trails and Technological Corridors on Permafrost. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 120–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-120-132>

Введение

Некоторые лесосечные работы и большинство лесохозяйственных работ, выполняемые при помощи различных машинно-тракторных агрегатов приходится осуществлять только в бесснежный период года [17, 18]. При проведении работ в теплый период года движители лесных машин могут наносить существенный вред, переуплотнения почвогрунты и образовывая глубокие колеи [8]. Воздействие движителей лесных машин на почвогрунты лесосек ухудшает лесорастительные свойства освоенных участков лесного фонда, темпы лесовозобновления и таксационные характеристики последующих генераций леса [5, 19].

При проведении таких работ на склонах в лесах на многолетней мерзлоте в теплый период года природно-производственные условия осложняются не только экологическими и техническими ограничениями по использованию тяжелой техники в горных лесах, но и особенностями строения и физико-механических свойств мерзлотных почвогрунтов [4, 5, 7, 9, 10].

Теоретическим и экспериментальным исследованиям взаимодействия движителей лесных машин и трелевочных систем на их базе посвящено зна-

чительное количество трудов отечественных и зарубежных ученых, при этом использованы различные методы научного проникновения – теоретические, эмпирические и полуэмпирические [2, 11, 12, 16, 20]. Однако взаимодействие движителей лесных машин с мерзлотными почвогрунтами на склонах изучено недостаточно, поскольку представляет собой чрезвычайно сложный процесс, особенности которого обусловлены состоянием краевой части массива почвогрунта, подверженного чередующимся промерзаниям и оттаиваниям.

Кроме этого, наличие мерзлого скользящего подстилающего водонепроницаемого слоя многолетней мерзлоты способствует концентрации влаги, особенно в зоне подошвы склона, что приводит к росту влажности (W , %) почвогрунта до уровней, достигающих предела его текучести (W_p , %), а в ряде случаев превосходящих это значение.

Отмеченные факторы являются причиной существенного снижения прочности почвогрунта – величины сцепления C и угла внутреннего трения φ , что приводит к уменьшению работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров как при однократном, так и при циклическом статическом и динамическом воздействиях движителей на почвогрунты [13, 14].

Наиболее сложные условия перемещения лесных машин по склонам в лесах на многолетней мерзлоте формируются при проявлении эффекта солифлюкции почвогрунта – медленного вязкопластического течения, которое начинается даже при небольших уклонах поверхности склона, с $2\text{--}3^\circ$. Наиболее активный эффект солифлюкции наблюдается с $8\text{--}10^\circ$.

Этот эффект сопровождается попеременным промерзанием переувлажненного почвогрунта и, как следствие, резким снижением сцепления частиц почвогрунта вдоль оттаявшего слоя при контакте с промерзшим. Это приводит к потере устойчивости краевой части массива и оползневым процессам.

Особенности образования колеи в данных условиях рассмотрены в работе [9], в которой предложена математическая модель равновесного состояния краевой части массива почвогрунта при эксплуатации лесных машин (тракторов), использующих лебедки – как отдельные агрегаты и как интегрированные в трансмиссию машин.

Целью исследования является теоретический анализ влияния геотехнических факторов сложения почвогрунтов склонов на многолетней мерзлоте на работоспособность трасс для лесных машин с установлением значимости этих факторов для показателей рассматриваемого процесса.

Объектом исследования являются геотехнические факторы взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесов криолитозоны на склонах. Применялись численные методы решения уравнений и аппроксимации данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Итогом моделирования [9] стало установление предельного соотношения на ограничение мощности (N) силы тяги трактора при движении к вершине склона с необходимым использованием силы тяги лебедки:

$$N \leq Sv \left[p_s \sqrt{\frac{h_k}{r_k}} + C + q \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q}{S} (\sin \alpha + \chi \cos \alpha) \right], \quad (1)$$

где S, r_k – площадь и радиус пятна контакта движителя с участком поверхности склона соответственно; v – скорость движения трактора; p_s – несущая способность почвогрунта; h_k – глубина образованной колеи; q – давление движителя трактора на почвогрунт в направлении, перпендикулярном поверхности склона; Q – вес лесной машины или трелевочной системы на ее базе; α – угол наклона склона к линии горизонта; χ – коэффициент трения движителя о влажный почвогрунт.

Из соотношения (1) выразим явно h_k через другие параметры:

$$h_k \geq \sqrt{\frac{S}{\pi}} \left\{ \frac{1}{p_s} \left[\frac{N}{vS} + q (\sin \alpha + \chi \cos \alpha - \operatorname{tg} \varphi) - C \right] \right\}^2. \quad (2)$$

Под работоспособностью трассы трелевочного волокна или технологического коридора будем понимать такое его физическое состояние, когда h_k не превосходит нормативное значение $h_n = 0,1$ м.

Для оценок введем коэффициент $K_h = \frac{h_k}{h_n}$, который характеризует меру превышения глубиной колеи нормативного уровня.

Как следует из анализа соотношений (1) и (2), в них присутствуют параметры прочности почвогрунта C , φ и p_s , зависящие от его влажности [1, 3, 15].

В работе [1] для 3 видов связных грунтов: легкого суглинка, суглинка и глины – предложено выделять 5 состояний (категорий) по влажности: I – $W < W_n \approx 45-50 \% W_t$; II – $W \approx W_n$; III – $W = 55-75 \% W_t$; IV – $W \approx W_t$; V – $W > W_t$, где W_n – предельная влажность.

Для всех 5 категорий грунтов в [1] представлены диапазоны изменений абсолютных значения p_s , C и φ .

Введем коэффициент влажности $K_W = \frac{W}{W_t}$. В соответствии с предложенной классификацией состояние, в частности, сухого суглинка (I категория) характеризуется коэффициентом $K_W = 0,30-0,35$, а диапазон $K_W = 1,15-1,25$ соответствует сверхвлажному состоянию грунта V категории.

Примем показатели p_{sc} , C_c и φ_c сухого суглинка за масштабную единицу.

На рис. 1 медианные абсолютные величины p_s , C и φ представлены в безразмерном виде и отложены по оси ординат, коэффициент K_W – на оси абсцисс.

Как следует из анализа линий на рис. 1, относительные зависимости несущей способности грунта p_s и его сцепления C от коэффициента влажности K_W практически совпадают, несмотря на то, что их абсолютные значения существенно отличаются – кратно, в т. ч. и на порядок.

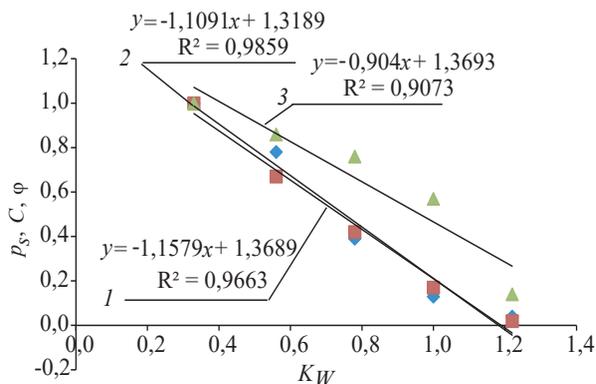
Этот результат носит принципиальный характер в контексте рассмотрения влияния эффекта солифлюкции на работоспособность трасс трелевочных волокон и технологических коридоров в лесах на склонах на многолетней мерзлоте.

При проявлении эффекта солифлюкции абсолютная величина сцепления C стремится к 0 вдоль контакта оттаявшего почвогрунта с мерзлым подстилающим слоем. Идентичность линий 1 и 2 на рис. 1 свидетельствует о единой природе влияния влажности почвогрунта на его сцепление и несущую способность, т. е. предельное состояние $C \rightarrow 0$ будет обуславливать и состояние

$p_s \rightarrow 0$, что отразится на работоспособности трассы трелевочного волокна или технологического коридора.

Рис. 1. Зависимость прочности грунта от коэффициента влажности K_W : 1 – p_s ; 2 – C ; 3 – φ

Fig. 1. The dependence of soil strength on the moisture coefficient K_W : 1 – p_s ; 2 – C ; 3 – φ



В итоге получены корреляционные соотношения с высокими коэффициентами детерминации:

$$p_s = p_{sc} (-1,1579 K_W + 1,3689);$$

$$C = C_c (-1,1091 K_W + 1,3189);$$

$$\varphi = \varphi_c (-0,904 K_W + 1,3693).$$

Рассмотрим влияние следующих факторов на процесс образования колеи при перемещении лесной машины на склоне на многолетней мерзлоте с применением сил тяги трактора и лебедки: углового параметра α наклона плоскости склона к линии горизонта; влажности W почвогрунта; мощности N силы тяги трактора; углового параметра β наклона плоскости анизотропии к плоскости склона, когда показатели почвогрунта, в первую очередь прочность, отличаются в различных направлениях; углового параметра ψ наклона плоскости дилатансии почвогрунта к плоскости склона, которая при внешних нагрузках вызывает в краевой части массива рост средних напряжений, что обуславливает увеличение сопротивления сдвигу и повышение несущей способности почвогрунта; веса Q лесной машины или трелевочной системы на ее базе и давления q движителя на почвогрунт.

Остановимся подробнее на учете влияния отмеченных факторов на формирование глубины колеи и работоспособности трелевочного волокна или технологического коридора.

Фактор угла наклона поверхности склона. На рис. 2 показано влияние угла α, \dots° на коэффициент K_h . Расчеты произведены для суглинка с характеристиками прочности в сухом состоянии: $p_{sc} = 96$ кПа, $C_c = 20$ кПа и $\varphi_c = 24^\circ$. Предел текучести $W_t = 45\%$, $K_W = 0,78$ ($W = 35\%$), нормативная глубина колеи $h_n = 0,1$ м. В расчетах используется трактор с номинальной мощностью $N_t = 419$ кВт, весом 5,8 т и максимальной нагрузкой до 9,072 т, т. е. суммарный вес лесной машины и трелевочной системы на ее базе (Q) изменялся в расчетах от 5,8 до 14,872 т, давление движителя на грунт q – от 10,76 до 27,6 кПа. В данном примере расчета для рис. 2 приняты $Q = 10$ т и $q = 18,56$ кПа.

Скорость движения трактора $v = 1$ м/с, площадь пятна контакта движителя с почвогрунтом $S = 5,3884$ м², коэффициент трения $\chi = 0,05$. Для оценки относительной величины допустимой, обеспечивающей равновесное состояние

краевой части массива почвогрунта, мощности силы тяги трактора введен коэффициент $K_N = \frac{N}{N_T}$. Абсолютное значение допустимой мощности силы тяги трактора принято в данном примере $N = 83,85$ кВт ($K_N = 0,2$).

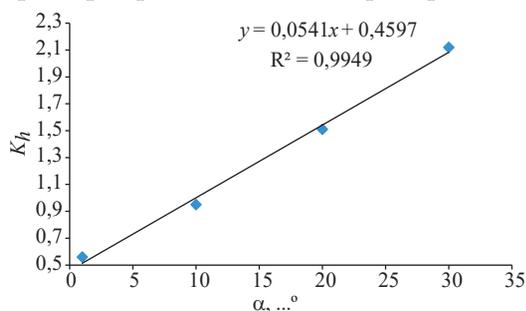


Рис. 2. Влияние угла наклона склона на глубину колеи

Fig. 2. The influence of slope angle on the track depth

Как следует из анализа полученной линейной зависимости на рис. 2 для таких условий движения лесной машины при пологих склонах (α не более 10°) глубина колеи не превышает нормативного значения ($K_h \leq 1$). На более крутых склонах установленная глубина колеи больше 0,1 м ($K_h > 1$).

Фактор влажности грунта. Зафиксируем угловой параметр $\alpha = 10^\circ$ и исследуем влияние коэффициента влажности K_w на коэффициент $K_h = \frac{h_k}{h_n}$. Результаты расчетов представлены на рис. 3, где по оси абсцисс отложены значения K_w , по оси ординат – K_h .

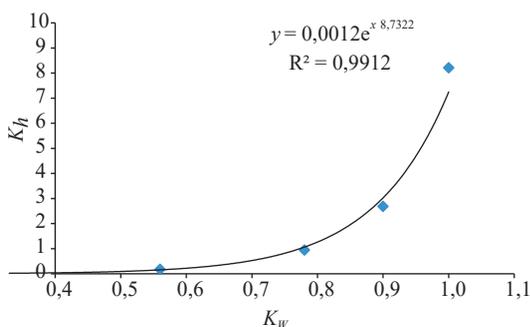


Рис. 3. Влияние влажности почвогрунта на глубину колеи

Fig. 3. The influence of soil moisture on the track depth

Как видим, наблюдается сильное экспоненциальное влияние влажности на глубину колеи и при таком уровне использования мощности силы тяги трактора ($K_N = 20\% N_T$) достичь нормативного значения $K_h = 1$ возможно только для почвогрунтов I–III категорий влажности.

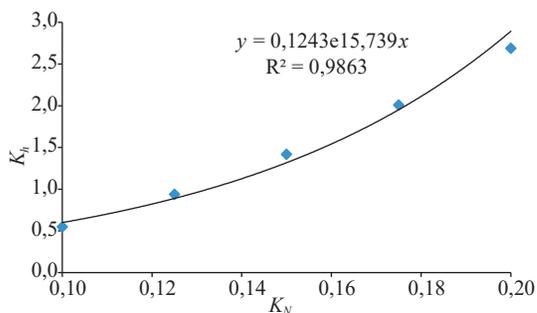
На графике полученной зависимости можно выделить 2 участка экспоненциальной кривой: асимптотический при $K_w \leq 0,8$ и круто восходящий вверх при превышении данного показателя.

Если $K_w \rightarrow 1$ и возможно проявление эффекта солифлюкции, глубина колеи более 0,5 м и работоспособность трассы трелевочного волока или технологического коридора резко снижается.

Можно сделать вывод о том, что для переувлажненных почвогрунтов IV и V категорий влажности одним из факторов повышения работоспособности трассы трелевочного волока или технологического коридора будет являться снижение реализуемой двигателем мощности силы тяги трактора.

Фактор мощности силы тяги трактора. Зафиксируем $K_W = 0,9$ ($W = 35\%$) и оценим (рис. 4) влияние коэффициента K_N (ось абсцисс) на показатель K_h (ось ординат).

Рис. 4. Влияние мощности силы тяги трактора на глубину образуемой колеи
Fig. 4. The influence of tractor traction power on the depth of the formed track



Как видим, если параметр K_N не превосходит 12–14% (N не более 50–60 кВт), то возможно достижение глубины колеи, близкой к нормативному значению при обеспечении дополнительно необходимой силы тяги лебедки для перемещения лесной машины или трелевочной системы на ее базе вверх по склону.

Работа трактора с показателем $K_N > 18–20\%$ приводит к тому, что глубина колеи h превышает 0,20–0,25 м, что можно считать неудовлетворительным результатом в контексте оценки работоспособности трассы трелевочного волокна или технологического коридора.

Результаты данного этапа исследования при весе лесной машины или трелевочной системы на ее базе $Q = 10$ т позволяют заключить, что при работе на крутых склонах ($\alpha = 25–30^\circ$) с влажностью почвогрунта близкой к пределу текучести необходимо отказаться от использования мощности силы тяги от двигателя трактора в пользу силы тяги лебедки. В этом случае теоретически возможно достижение глубины колеи в диапазоне 0,085–0,130 м при математическом ожидании h вблизи нормативного уровня в 0,1 м.

Факторы анизотропии и дилатансии. Рассмотрим при постоянном параметре $N = 83,85$ кВт ($K_N = 0,2$) и давлении двигателя на почвогрунт $q = 18,56$ кПа ($Q = 10$ т) влияние анизотропии и дилатансии на распределение сил тяги трактора и лебедки для благоприятных условий перемещения лесной машины: пологого склона ($\alpha = 5^\circ$) и умеренной влажности почвогрунта ($K_W = 0,73$, $W = 33\%$).

Оценка основана на методических положениях [6, 7, 10] о влиянии анизотропии свойств и дилатансии грунта на его прочность. Эти положения могут быть использованы при оценке устойчивости краевой части массива оттаивающего почвогрунта на склонах лесов на многолетней мерзлоте.

На рис. 5 представлены результаты расчетов, где по оси абсцисс – угловые параметры $\beta(\psi), \dots^\circ$ и по оси ординат – коэффициент K_h . При оценке влияния одного углового параметра другой параметр принимался равным 0, т. е. оценка производилась последовательно.

Анализ полученных результатов и графических линейных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что оба фактора с ростом их угловых параметров способствуют снижению глубины колеи, при этом, судя по значениям угловых коэффициентов, данное влияние существенно (более чем 2,5 раза) от-

личается в пользу анизотропии. При заданной мощности силы тяги трактора $N = 83,85$ кВт коэффициент K_h значительно ниже 1.

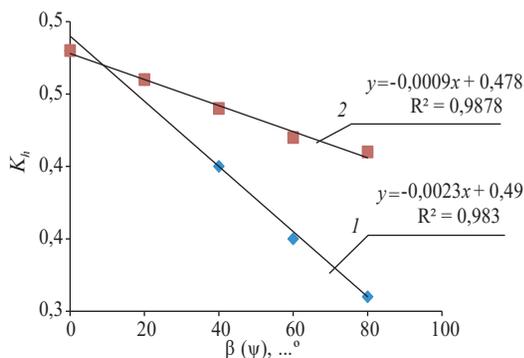


Рис. 5. Влияние анизотропии и дилатансии на глубину образуемой лесной машиной колеи:

1 – анизотропия; 2 – дилатансия

Fig. 5. The influence of anisotropy and dilatancy on the depth of the track formed by a forestry machine:

1 – anisotropy; 2 – dilatancy

Такая тенденция имеет место и при увеличении уровня мощности силы тяги трактора в 1,5 раза (до 125 кВт), однако достичь нормативной глубины колеи в этом случае не представляется возможным даже при плоскостях анизотропии и дилатансии, ориентированных перпендикулярно к поверхности склона. В частности, при росте углов β и ψ от 0 до 80° коэффициент K_h снижается почти на 40 % – с 1,57 до 1,13, но, тем не менее, превосходит нормативный уровень.

При повышении влажности W до 35 % и более учет факторов анизотропии и дилатансии практического значения не имеет, поскольку глубина колеи превосходит нормативный уровень. При таких условиях, как отмечено выше, необходимо существенно снижать мощности силы трактора в соответствии с данными рис. 4 или вес лесной машины (трелевочной системы на ее базе) Q и, как следствие, давление движителя на почвогрунт q .

Фактор веса лесной машины или трелевочной системы на ее базе и давления движителя на почвогрунт. Исследуем возможность достижения нормативной глубины колеи при наиболее типовых условиях движения лесной машины: $\alpha = 15^\circ$, $K_w = 0,78$ ($W = 35\%$), $K_N = 0,2$ при изменении веса Q от 5,8 до 12 т и давления движителя q – от 10,76 до 22,27 кПа.

На рис. 6 представлены результаты расчетов влияния q на K_h .

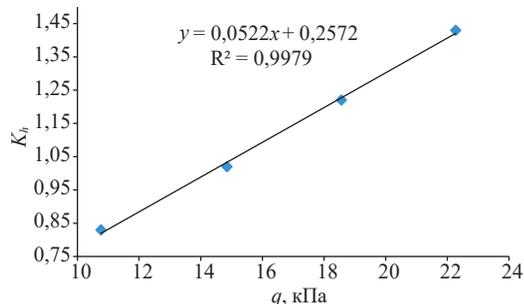


Рис. 6. Зависимость глубины образуемой лесной машиной колеи от давления движителя

Fig. 6. The dependence of the depth of the track formed by a forestry machine on the pressure of the propeller

При весе лесной машины (трелевочной системы на ее базе) до 8 т и давлении движителя не более 14 кПа возможно обеспечение нормативных значений глубины колеи при данном уровне мощности силы тяги трактора. Любые другие изменения в сторону роста указанных параметров влекут за собой повышение глубины колеи по линейному закону.

Таким образом, к сложным условиям перемещения лесных машин на склонах лесов на многолетней мерзлоте следует отнести крутизну склона и влажность краевой части массива почвогрунта, близкую к пределу текучести. В этих условиях достижение нормативной глубины колеи возможно за счет как снижения мощности силы тяги трактора, так и веса лесной машины или трелевочной системы на ее базе, приводящего к уменьшению давления движителя на почвогрунт.

Изучим (рис. 7) совместное влияние абсолютных значений параметров q , кПа, и N , кВт, на глубину образуемой лесной машиной колеи h , м. Расчеты произведены при $\alpha = 15^\circ$ и $K_w = 0,78$ ($W = 35\%$). Анализ результатов расчетов показывает, что в 68 % от общего объема области определения аргументов (параметров) q и N глубина образуемой движителем лесной машиной колеи h укладывается в нормативный уровень 0,1 м. Еще 12 % совокупного объема аргументов обеспечивает достижение двукратного норматива глубины в 0,2 м, что можно считать предельным (оценкой сверху) результатом для указанных условий перемещения лесной машины по склону. При этом мощность силы тяги трактора не должна превышать 15 % номинальной величины, а вес лесной машины или трелевочной системы на ее базе – 15 т при давлении движителя на почвогрунт не более 28 кПа.

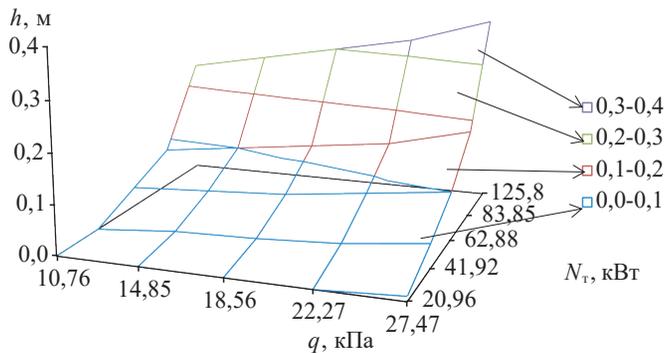


Рис. 7. Совместное влияние давления движителя на почвогрунт и мощности силы тяги трактора на глубину образуемой колеи

Fig. 7. The combined effect of the propeller pressure on the soil and the tractor traction power on the depth of the formed track

Заключение

Выполненные исследования позволили при реализации лесосечных и лесохозяйственных работ на склонах лесов на многолетней мерзлоте оценить влияние на процесс образования колеи и работоспособность трассы трелевочного волока или технологического коридора ряда геотехнических, технических и геомеханических факторов.

К этим факторам (по мере снижения значимости) отнесены:

- влажность почвогрунта;
- мощность силы тяги движителя трактора;
- вес лесной машины или трелевочной системы на ее базе и давление движителя на краевую часть массива почвогрунта;
- ориентация поверхности склона к линии горизонта;

- ориентация плоскости анизотропии свойств массива в направлениях параллельном и перпендикулярном поверхности склона;
- ориентация плоскости дилатансии почвогрунта.

Установлены функциональные и корреляционные соотношения, количественно позволяющие произвести расчет глубины образующейся под воздействием движителя лесной машины колеи с учетом всех выявленных факторов.

Определение таких параметров, как мощность силы тяги движителя трактора, вес лесной машины или трелевочной системы и ориентация поверхности склона к линии горизонта, не вызывает затруднений: они либо заданы, либо легко корректируются в процессе выполнения работ.

Наиболее трудоемкой операцией является мониторинг влажности почвогрунтов, слагающих массив склона вдоль трассы движения, с учетом расположения машины относительно основания склона, длины трассы, сезонно-климатических особенностей, показателей гидрогеологии – мощности слоя оттаивающего почвогрунта (сезонной мерзлоты) и удаленности волока от границы вечной мерзлоты и др.

Учет анизотропии свойств и дилатансии почвогрунта способствует повышению качества прогноза работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на 5–10 %, однако практическая реализация этого учета пока является сложной. Вместе с тем принятие во внимание этих факторов повышает адекватность прогноза устойчивости краевой части массива грунта на 20–30 %, что следует признать значимым результатом при комплексной оценке его геомеханического состояния.

Результаты исследования выдвигают в разряд наиболее актуальных проблем определение работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров при проведении лесосечных и лесохозяйственных работ на крутых склонах оттаивающих почвогрунтов криолитозоны с использованием лесных машин, оснащенных лебедками. Прогнозирование работоспособности трасс трелевочных волоков и технологических коридоров будет служить качественной поддержкой принятия организационно-технологических решений по их оптимальному размещению на лесосеке (вырубке).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агеев Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
Ageev Ya.S. *All-Terrain Wheeled and Combined Propellers*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1972. 184 p. (In Russ.).
2. Божбов В.Е., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемшикова Ю.М. Анализ подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек // *Resources and Technology*. 2019. Т. 16, № 2. С. 13–35.
Bozhbov V.E., Grigorev I.V., Rudov S.E., Teterlevleva E.V., Chemshikova Yu.M. Analysis of Approaches to the Description of Processes of Interaction of the Propulsion of Forest Machines with the Soil of the Cutting Area. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 13–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4482>
3. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра, 1980. 270 с.
Bulychev N.S. *Mechanics of Underground Structures in Examples and Problems*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 270 p. (In Russ.).

4. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. школа, 1979. 447 с.
Vyalov S.S. *Rheological Principles of Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 447 p. (In Russ.).

5. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 25–29.

Grigoreva O.I. Features of Natural Reforestation in the Conditions of the Cryolithozone. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2018, vol. 6, no. 4(40), pp. 25–29. (In Russ.).

6. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженер. изыскания. 2013. № 9. С. 44–50.

Zerkal O.V., Fomenko I.K. Assessment of Anisotropy Effect of Rock Properties on Slope Stability. *Inzhenernye izyskaniya*, 2013, no. 9, pp. 44–50. (In Russ.).

7. Калабина М.В., Царапов М.Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: материалы Всерос. конф. с междунар. участием. 2017. С. 542–546.

Kalabina M.V., Tsarapov M.N. Strength Properties of Thawing Soils. *Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otraslevoj nauki: Materials of the All-Russian Conference with International Participation*, 2017, pp. 542–546. (In Russ.).

8. Калистратов А.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. О важности исследований экологической эффективности процесса трелевки // Наука, образование, инновации в приграничном регионе: материалы республиканск. науч.-практ. конф. Петрозаводск: Петрозаводск. гос. ун-т, 2015. С. 7–9.

Kalistratov A.V., Grigoreva O.I., Grigorev G.V., Dmitrieva I.N. On the Importance of Research into the Environmental Efficiency of the Skidding Process. *Science, Education, Innovations in the Border Region: Materials of the Republican Scientific and Practical Conference*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2015, pp. 7–9. (In Russ.).

9. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 140–152.

Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Druz'yanova V.P. The Formation of a Track by the Propulsion of a Forestry Machine on the Slope of the Thawing Soil in the Permafrost Zone, Taking into Account the Effect of Solifluction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 140–152. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-140-152>

10. Мирный А.Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы ее количественной оценки // Инженер. геология. 2019. Т. XIV, № 2. С. 34–43.

Mirnyu A.Yu. Disperse Soils Dilatancy Studies and the Methods of its Quantitative Assessment. *Inzhenernaya geologiya* = Engineering Geology World, 2019, vol. XIV, no. 2, pp. 34–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-2-34-43>

11. Никуфорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4(16-4). С. 320–323.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling of the Influence of Propulsion of Forest Machines on the Soil of the Cutting Area. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2015, vol. 3, no. 5-4(16-4), pp. 320–323. (In Russ.).
<https://doi.org/10.12737/16269>

12. Никуфорова А.И., Григорьева О.И., Киселев Д.С., Хахина А.М., Рудов М.Е. Оценка экологической безопасности работы лесных машин // Природные ресурсы и

экология Дальневосточного региона: материалы Междунар. науч.-практ. форума. Хабаровск: ТОГУ, 2013. С. 134–138.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S., Khakhina A.M., Rudov M.E. Environmental Safety Assessment of Forest Machinery. *Prirodnye resursy i ekologiya Dal'nevostochnogo regiona*: Materials of the International Scientific and Practical Forum. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2013, pp. 134–138. (In Russ.).

13. 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 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 101–117.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 2, pp. 101–117. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-101-117>

14. 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 // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 116–128.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'ev M.F., Puchnin A.N. Features of Taking into Account the Condition of Frozen Soils Solid Mass in Cyclic Interaction with the Skidding System. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 116–128. (In Russ.).

https://doi.org/10.12737/article_5c92016f49c838.40242030

15. Царанов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2007. № 6. С. 31–34.

Tsararov M.N. Formation of Strength Characteristics of Soils during Thawing. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya* = Moscow University Bulletin. Series 4: Geology, 2007, no. 6, pp. 31–34. (In Russ.).

16. Grigorev I., Zyryanov M., Medvedev S., Mokhiev A., Egipko S., Perfiliev P., Savvateeva I. The Experimental Study of Logging Residue Stock on Logging Sites Following Clear-Cutting Using a Sorting Machine System. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 267–275.

<https://doi.org/10.1504/IJSPM.2023.10062370>

17. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Ivanov V., Shadrina S., Grigorev I. Influence of Different Forest Management Techniques on the Quality of Wood. *Journal of Renewable Materials*, 2021, vol. 9, no. 12, pp. 2175–2188.

<https://doi.org/10.32604/jrm.2021.016387>

18. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Ivanov V., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative Analysis of Thinning Techniques in Pine Forests. *Journal of Forestry Research*, 2022, vol. 33, pp. 1145–1156.

<https://doi.org/10.1007/s11676-021-01415-8>

19. Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for Calculating Schemes of Transport Routes in a Felling Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. no. 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012025>

20. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Z., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical Approaches to Logging Trail Network Planning: Increasing Efficiency of Forest Machines and Reducing Their Negative Impact on Soil and Terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 61–75. <https://doi.org/10.3233/AJW190049>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Original article

УДК 674

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-133-142

Planting Spacing and Variation in Mechanical Properties of Poplar Wood (*Populus deltoids*)

Majid Kiaei; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-8069>

Department of Wood and Paper Science and Technology, Cha. C., Islamic Azad University, Chalus, Iran; mjd_kia59@yahoo.com

Received on February 26, 2025 / Approved after reviewing on May 17, 2025 / Accepted on May 18, 2025

Abstract. Initial planting spacing affects stem diameter, tree height, and ultimately wood quality due to root and crown competition to reach light, water and nutrients. In the present study, we have investigated the effect of planting spacing and the longitudinal position along the stem height on wood density and mechanical properties of *Populus deltoids*. The study area has been located in the province of Mazandaran, in the north of Iran. 9 poplar trees (*Populus deltoids* Barter.ex Marsh) have been randomly selected in 3 PS of the Sari (Mazandaran) Wood and Paper Factory plantation 2×2, 2×3 and 3×3 m. 3 disc samples have been taken at 3 positions along longitudinal direction from bottom to upward (breast height, 50, and 75 % stem height) to measure wood density and investigate its mechanical properties according to ISO and ASTM standard. Testing samples have been prepared from mature wood. The results of the research have shown that the planting spacing significantly influences wood density and mechanical properties. The effect of longitudinal position on the modulus of elasticity has been significant with no changes in the wood density, modulus of rupture, compression parallel to grain and nail withdrawal resistance values. The most optimal initial spacing in view of wood density and mechanical properties has been found at the planting spacing 2×2 m. Analysis of wood quality characteristics indicates that closer PS is more suitable for poplar plantation.

Keywords: *Populus deltoids*, planting spacing, longitudinal position along the stem height, wood density, mechanical properties of wood

For citation: Kiaei M. Planting Spacing and Variation in Mechanical Properties of Poplar Wood (*Populus deltoids*). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 133–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-133-142>

Научная статья

Густота посадки и изменение механических свойств древесины на плантации тополя *Populus deltoids*

М. Киаеи; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-8069>

Исламский университет Азад, кафедра целлюлозно-бумажных наук и технологий, Чалусское отделение, г. Чалус, Иран; mjd_kia59@yahoo.com

Поступила в редакцию 26.02.25 / Одобрена после рецензирования 17.05.25 / Принята к печати 18.05.25

Аннотация. Густота посадки оказывает влияние на диаметр ствола, высоту дерева и, в конечном счете, на качество древесины ввиду конкуренции корней и крон деревьев за свет, воду и питательные вещества. В настоящем исследовании изучено воздействие густоты посадки и положения древесины по высоте ствола на плотность древесины и ее механические свойства у *Populus deltoids*. Район исследования – провинция Мазендеран на севере Ирана. 9 деревьев тополя (*Populus deltoids* Barter.ex Marsh) были выбраны случайным образом на 3 участках плантации целлюлозно-бумажного комбината г. Сари (Мазендеран) размерами 2×2, 2×3 и 3×3 м. Для измерения плотности и учета механических свойств древесины использованы 3 образца дисковой формы, взятые в 3 положениях в продольном направлении по высоте дерева снизу вверх (высота на уровне груди, 50 и 75 % высоты ствола). В соответствии с требованиями стандартов Международной организации по стандартизации (ISO) и Американского общества испытаний и материалов (ASTM), образцы изготовлены из зрелой древесины. Результаты исследования продемонстрировали существенное влияние густоты посадки на плотность и механические свойства древесины. Влияние положения древесины по высоте ствола на модуль упругости оказалось значительным, при этом плотность, предел прочности при изгибе, сжатие вдоль волокон и сопротивление выдергиванию гвоздя не изменились. Оптимальная первоначальная густота посадки с точки зрения плотности древесины и ее механических свойств была обнаружена на участке площадью 2×2 м. Анализ качественных характеристик древесины установил, что для посадки тополя больше подходит размещение с меньшим шагом.

Ключевые слова: *Populus deltoids*, густота посадки, положение древесины по высоте ствола, плотность древесины, механические свойства древесины

Для цитирования: Kiaei M. Planting Spacing and Variation in the Mechanical Properties of Poplar Wood (*Populus deltoids*). // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 133–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-133-142>

Introduction

Due to the increasing demand for wood and the limitation of wood harvesting from natural forests in Iran, the need for forest plantations and agroforestry systems with fast-growing and preferably endemic species has become urgent [32]. Poplar (*Populus sp.*) is one of the most valuable and high-yielding tree species in the world and is an important wood supply source in Iran. It has a high growth rate and short harvesting term, which is why it is highly used in wood and paper industry [32]. *Populus deltoids* (the *Salicaceae* family) is native to North America and introduced to Europe, Australia and Southeast Asia [34, 35].

Intensive management in plantations affects growth features, biomass and wood properties of different tree species. Lei et al. (1997), DeBell et al. (2002), Naji et al. (2013), and Naji et al. (2015) have investigated wood quality using red alder (*Alnus rubra*), poplar (*Populus spp.*), rubber tree (*Hevea brasiliensis*) and maple (*Acer velutinum*) wood, respectively, as examples [8, 22, 27, 28]. Numerous studies have examined the effects of silvicultural practices on wood properties of different tree species. Tree spacing is one of the most common stand parameters for controlling the tree growth. The most important goals of choosing optimal tree spacing, according to foresters, are to increase the diameter of a tree stem, as well as improve wood properties and increase forest production in terms of wood quality [42, 43].

In a well-managed plantation, trees receive more light, nutrients and water; the suppressed trees are removed in order to make enough space for quality trees [7]. Suitable planting distances ensure the required space for tree growth and optimize biomass production per unit area [13]. However, it is little-known how tree growth alters wood and fiber characteristics in poplar. Therefore, knowing the relationship between planting spacing and tree and wood characteristics can help foresters to maximize biomass production without lowering wood quality. In this direction, Riahifar et al. (2009) have reported a significant variance in longitudinal and diameter growth in poplar and paulownia species at different initial spacings [34]. The height and stem diameter of poplar trees has decreased with increasing the initial spacing due to high light competition. Khan and Chaudhry (2007) have determined the effect of an increase in the in the initial spacing from 6.1×3.7 to 3.7×12.1 m on the growth rate (tree diameter and longitudinal growth) of *Populus deltoids* in Pakistan [17]. Hosseinzadeh et al., (1998) have examined the effect of initial spacing on annual ring width and wood properties of 2 clones of *Populus deltoids* and have reported a significant influence of initial spacing on wood density, fiber length, annual growth, diameter at breast height, tree height, branch density, and bark weight. The lowest wood density has been recorded in the 1st log (near the stump) and the highest – in the top log (near the crown). The variation of fiber length along longitudinal direction from the base to the 3rd log has had ascending and descending trends in the crown log [14]. Naji et al. (2015) have determined no significant effect of initial spacing of *Acer velutinum* on physical properties and fiber biometrical features such as wood density, fiber length, diameter and cell wall thickness [27]. Afhami et al. (2012) have evaluated the effect of agroforestry practices on *Populus nigra* wood physical properties along longitudinal and radial direction and have reported that wood density and volumetric shrinkage have increased with an increase in initial planting spacing. Furthermore, wood density and volumetric shrinkage have decreased along the stem from the base upwards and have increased in longitudinal shrinkage [1]. Guler et al. (2015) have reported that ash wood grown in wider spacings possesses high mechanical properties. In other words, the mechanical properties (compression strength parallel to grain, tensile stress perpendicular to grain, bending strength, impact bending strength and modulus of elasticity) of wood have increased with an increase in the planting spacings (PSs) from 3×2 to 4×4 m [12].

Some researchers have reported on the physical properties [21], biometric features [31, 41], and papermaking properties [15] of poplar wood, but there is little research on the effect of initial spacing on poplar wood properties. Therefore, the present study has aimed to investigate the effect of different initial spacing as well as longitudinal position (LP) along the stem height on wood density and mechanical properties of *Populus deltoids*.

Research Objects and Methods

The *Populus deltoids* Barter.ex Marsh trees have been randomly taken from a trial 22-year-old plantation planted by Wood and Paper Industry Factory located in Sari ($53^{\circ}3'41''$ E and $36^{\circ}19'19''$ N), Mazandaran Province, Iran at 3 PSs 2×2 , 2×3 and 3×3 m. For 30 random trees from all 3 PS, height and stem diameter have been measured.

To examine the wood properties of the plantation, 3 trees have been sampled from each PS (in total, 9 trees) and sample discs have been taken at breast height (≈ 1.30 m), 50 %, and 75 % of the total tree height (Table 1). The samples have been prepared from near the bark in accordance with the ISO 3129-1975 (E) Standard (International Organization for Standardization (ISO), 1975a).

Table 1

Basic information on the *Populus deltoids* plantation

Planting spacing (PS)	2×2	2×3	3×3
PD, trees per ha ⁻¹	2,500	1,666	1,111
TH, m	22.45	19.78	20.83
DBH, cm	18.43	15.51	16.77
Altitude, m	100		
Temperature, °C	15		
AP, mm	789		
Soil texture	Silt clay to clay loam		

Note: PD – planting density; TH – tree height; DBH – diameter at breast height; AP – annual precipitation.

Wood density (WD). To determine wood density, the samples have been respectively prepared in accordance with the ISO–3131 Standard (1975). The initial weight and dimensions of the samples have been measured. After that, the samples have been dried at a temperature of 103 ± 2 °C for 24 hours, and then the oven-dry weight and the dimensions of the samples have been measured with digital balance and Vernier caliper (with an accuracy of 0.001). Finally, wood density has been calculated as a ratio of oven-dry weight to dry volume [20].

Mechanical properties. From each tree, logs have been taken from breast height to calculate static bending parameters: modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), compression parallel to grain (CPG) and nail withdrawal resistance (NWR), respectively. The testing samples have been taken from near the bark in accordance with the ASTM-D143–94 Standard. The samples have been conditioned in 65 ± 3 % relative humidity and 20 ± 2 °C temperature for at least 4 weeks before testing, until they have reached the equilibrium moisture content of about 12 %.

Statistical analysis. The interaction effect of initial spacing and longitudinal position along the stem height on the wood density and mechanical properties of *Populus deltoids* have been measured. Data analysis has been performed using SPSS statistical software ver. 20, and 2-way analysis of variance in a completely randomized design. Comparison and grouping of means has been performed via Duncan's test at 95 % confidence level.

Results and Discussion

The results of the analysis of variance (ANOVA) of wood density and mechanical properties of poplar wood are represented in Table 2.

Table 2

The results of the ANOVA of poplar wood properties

Wood properties	PS (A)		LP (B)		A × B	
	F	Sig	F	Sig	F	Sig
WD	3.897	0.024*	1.852	0.162	2.110	0.086
MOR	43.240	0.000*	1.630	0.200	3.670	0.010*
MOE	10.500	0.000*	21.540	0.000*	1.420	0.240
CPG	3.590	0.038*	430.000	0.650	14.790	0.000*
NWR	46.250	0.000*	0.820	0.440	1.420	0.240

Note: * – significant at 5 %; LP – longitudinal position along the stem height; MOR – modulus of rupture; MOE – modulus of elasticity; CPG – compression parallel to grain; NWR – nail withdrawal resistance; F – F-value from ANOVA; Sig – significance level. Degree of freedom is 2.

Wood density. The results of the analysis of variance (ANOVA) have shown that the PS has significantly affected the WD of *Populus deltoids* (Table 2). The independent effect of LP and the PS × LP effect on WD have not been significant. WD has been decreasing with increasing the PS. The mean WD values at the PSs 3×3 (0.397 g/cm³) and 2×3 m (0.389 g/cm³) have fallen into one group and the ones at the PS 2×2 m (0.401 g/cm³) into another (Table 3).

WD is of the most important physical properties of wood that relates to other wood properties [38]. In general, changes in the density of diffuse-porous hardwoods are not dependent on the growth rate, but on the anatomical structure of wood such as fiber cell wall thickness, early-late wood ratio, vessel, fiber, and parenchyma percentages [43]. The direct relationship between cell wall thickness and density and the converse relationship between vessel percentage and density have been demonstrated by some researches [5, 29, 43]. WD has been decreasing with an increase in the PS. An increase at the PS 2×2 m is highly related to an increase in cell wall thickness [36]. The cell wall thickness has been 4.57 μm at the PS 2×2 m, 3.87 μm at the PS 2×3 m and 4.23 μm at the PS 3×3 m [19].

The process of changing WD with the initial spacing is still debated. No significant effect of the PS has been found for maple wood [27], eucalyptus wood [9], *Schizolobium parahyba* wood [26] and *Tectona grandis* wood [23]. A direct relation between planting spacing and WD has been found for poplar wood [14]. For the current study, significant differences have been observed only for WD, starting from increasing the PS from 2×2 to 3×3 m. These discrepancies are probably due to differences in the species being evaluated, as well as in the environmental conditions, and the extent of the PSs tested [37].

Although the effect of the LP on WD has not been significant (Table 2), a decreasing trend in this parameter has been observed along the stem from the base upwards (Table 3). A decreasing trend along longitudinal direction has been supported by Repola (2006) for *Betula pendula* and *B. pubescens* [33]; Izekor et al. (2010) for *Tectona grandis* [16]; Zeidler (2012) for *Corylus colurna* [40]; Kiaei and Farsi (2016) for *Albizia julibrissin* [18]; Kord et al. (2010) for *Populus euramericana* [21]; Topaloglu and Erisir (2018) for *Fagus orientalis* [37], and by Mahmud et al. (2017) for *Neolamarckia cadamba* [25]. In contrast, Otoide (2016) has reported an increase in WD with the longitudinal position in *Azelia Africana* trees [30]. Chowdhury et al., (2007) have also observed no significant differences among different parts of the stem (butt, center, and crown) of *Casuarina equisetifolia* [6]. Machado et al.

(2014) have reported an increase in WD with the height level especially from 35 to 65 % of the tree height for blackwood (*Acacia melanoxylon*) in Portugal [24]. Githio-mi and Kariuki (2010) have revealed that the basic WD of *Eucalyptus grandis* has been decreasing from the base to breast height and then reaching its maximum at the 60 % height point [11]. These changes can be related to wood species, as well as environmental and climatic conditions [36, 37]. In this study, poplar WD along longitudinal direction has varied from 0.390 to 0.398 g cm⁻³ for all the 3 PSs.

Table 3

The descriptive statistical data on poplar WD

PS, m	LP	WD, g/cm ⁻³	CPG, MPa	MOR, MPa	MOE, MPa	NWR, kg/cm
2×2	DBH	0.386	32.00	89.00	8,200	310.00
	50 %	0.414	33.00	92.00	9,000	370.00
	75 %	0.410	34.00	95.00	9,900	320.00
	Mean	0.401 B	33.00 A	92.00 A	9,033 A	333.33 A
2×3	DBH	0.387	28.00	70.00	7,100	250.00
	50 %	0.390	27.00	75.00	7,800	300.00
	75 %	0.392	29.00	70.00	7,700	250.00
	Mean	0.389 A	28.00 B	72.50 B	7,533 C	266.67 B
3×3	DBH	0.401	30.00	89.00	7,700	290.00
	50 %	0.393	32.00	91.00	8,300	320.00
	75 %	0.396	31.00	92.00	9,000	310.00
	Mean	0.397 AB	31.00 A	90.67 A	8,333 B	306.67 A
Mean of wood properties in LP	DBH	0.390	30.00	82.67	7,666 c	283.33
	50 %	0.397	30.67	86.00	8,366 b	330.00
	75 %	0.398	31.67	85.67	8,866 a	293.33

Note: The capital letters indicate significance in the 3 PSs; capital letters indicate the mean groupings of wood properties among PSs, while small letters indicate the mean groupings of wood properties along the stem height.

Mechanical properties. MOR and MOE are the 2 crucial mechanical properties that should be carefully considered and related to WD [39]. MOE, or stiffness, is a measure of deformation that wood undergoes when subject to an applied load, and it is measured as a ratio of stress and strain. It is a property of particular interest to growers and processors of structural lumber as it determines the end-use and value of lumber cut from a tree [2].

Compression parallel to grain. The results of the ANOVA have shown the significant effect of PS on the CPG (Table 2). The independent effect of LP and the PS × LP effect on the CPG of *Populus deltoids* wood have not been significant. The CPG value in poplar species at the PS 2×2 m has been higher compared to the ones measuring 2×3 and 3×3 m (Table 3).

According to Bozkurt and Erdin (1990), the classes of CPG are listed as: < 20 MPa – very small, 20–35 MPa – small, 35–55 MPa – medium, 55–85 MPa – high, and > 85 MPa – very high. The mean CPG has been found to be 33MPa for the PS 2×2 m, 28 MPa for the one measuring 2×3 m and 31 MPa for the one measuring 3×3 m [4]. According to this, poplar belongs to the group of trees with small CPG.

An insignificant increasing trend for CPG has been observed along the stem from the base upwards, in this study (Table 3). This result has been previously report-

ed by Machado et al., (2014) for blackwood [24]. They have revealed that the CPG of blackwood grown in Portugal does not vary with the longitudinal position (5, 35 and 65 % of stem height). In contrast to these findings, Topaloglu and Erisir (2018) have detected a decreasing trend in the CPG from the height of 1.30 to 12.30 m for beech wood in Turkey [37]. Also, Izekor et al. (2010) have observed a decreasing trend in the CPG from the base to the top for *Tectona grandis* wood [16].

Modulus of rupture. The results of the ANOVA have demonstrated the significant effect of PS on the MOR (Table 2). The independent effect of LP and the PS \times LP effect on the MOR of *Populus deltoids* wood have not been significant. The MOR value in poplar species in the PS 2 \times 2 m (92MPa) has been higher compared to the ones in the PSs 2 \times 3 (72.5 MPa) and 3 \times 3 m (91 MPa) (Table 3).

According to Bozkurt and Erdin (1990), the classes of MOR are listed as: <50 MPa – very small, 50–85 MPa – small, 85–120 MPa – medium, 120–175 MPa – high, and > 175 MPa – very high [4]. According to this classification, poplar wood in the PS 2 \times 2 and 3 \times 3m falls under the 3rd category (medium) and in the one measuring 2 \times 3 m – under the 2nd category (small).

Modulus of elasticity. The statistical analysis has shown the significant effect of PS and LP on the MOE (Table 2). The PS \times LP effect on the MOE of *Populus deltoids* wood has not been significant. The MOE value in poplar species at the PS 2 \times 2 (9,033 MPa) has been higher compared to those in the PS 2 \times 3 (7,533 MPa) and 3 \times 3 m (8,333 MPa). MOE along the stem has been increasing from the base upwards (Table 3).

According to Bozkurt and Erdin (1990), the classes of MOE are defined as: < 6,000 MPa – very small, 6,000–10,000 MPa – small, 10,000–13,000 MPa – medium, 13,000–16,000 MPa – high, and > 16,000 MPa – very high. The overall mean MOE for poplar wood has been found to be 8,300 MPa [4]. According to the classification above, poplar wood at all the 3 PSs belong to the “small” category.

Nail withdrawal resistance. The results of the ANOVA have demonstrated the significant effect of PS on the NWR (Table 2). The independent effect of LP and the PS \times LP effect on the NWR of *Populus deltoids* wood have not been significant. The NWR value in poplar species at the PS 2 \times 2 m has been higher compared to the ones in the PSs 2 \times 3 and 3 \times 3 m (Table 3).

The data obtained has indicated that the highest and lowest MOE, MOR, CPG and NWR in wood have been found at the PSs 2 \times 2 and 2 \times 3 m, respectively. The mechanical properties of wood largely depend upon its density and microfibril angle (MFA) [7, 10]. The high MFA and low WD values at the PS 2 \times 3 m are associated with low mechanical properties of wood, and the low MFA and high WD values – with high mechanical properties at the PS 2 \times 2 m. Also, density is the most important physical characteristic determining the compression strength of a wood sample, and a significant correlation between density and compression strength exists [12]. Moreover, there are more material distributed internal stresses in dense wood, so the mechanical properties of wood are also increasing [3]. In the present study, a declining trend in mechanical properties at the PSs 2 \times 2 and 2 \times 3 m can be related to the correlation mentioned above.

Conclusion

The effect of initial spacing on WD and mechanical properties has been found to be significant. The mean dry WD and mechanical properties at the PS 2 \times 2 m

has been higher than at the others. The lowest WD and mechanical properties have been found at the PS 2×3 m. LP has been revealed to significantly effect the MOE. The trend in the variation of MOE along LP direction from the base upwards has been towards increasing. The poplar plantation with low spacing is recommended due to higher WD, favorable mechanical properties and higher volumes of wood production in short rotation periods compared to other PS.

REFERENCES

1. Afhami C.C.D., Karimi A.N., Pourtahmasi K., Asadi F., Mohamadzadeh M. The Effects of Agroforestry Practices on Physical Properties in of Populus Wood in Radial and Longitudinal Axes. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 53–64. (In Pers.).
2. Antony F., Schimleck L.R., Jordan L., Daniels R.F., Clark III A. Modeling the Effect of Initial Planting Density on within Tree Variation of Stiffness in Loblolly Pine. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69, pp. 641–650. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0180-1>
3. Baar J., Tippner J., Rademacher P. Prediction of Mechanical Properties – Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity – of Five Tropical Species by Nondestructive Methods. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 239–252. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>
4. Bozkurt A.Y., Erdin N. Physical and Mechanical Properties of Wood Used in Trade. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 1990, ser. B, vol. 40, no. 1, pp. 6–24.
5. Cato S., Mcmillan L., Donaldson L., Richardson T., Echt C., Gardner R. Wood Formation from the Base to the Crown in *Pinus Radiata*: Gradients of Tracheid Wall Thickness, Wood Density, Radial Growth Rate and Gene Expression. *Plant Molecular Biology*, 2006, vol. 60, pp. 565–581. <https://doi.org/10.1007/s11103-005-5022-9>
6. Chowdhury Q., Rashid A.Z.M.M., Newaz S., Alam M. Effects of Height on Physical Properties of Wood of Jhau (*Camarina equisetifolia*). *Australian Forestry*, 2007, vol. 70, iss. 1, pp. 33–36. <https://doi.org/10.1080/00049158.2007.10676260>
7. Clark III A., Jordan L., Schimleck L., Daniels R.F. Effect of Initial Planting Spacing on Wood Properties of Unthinned Loblolly Pine at Age 21. *Forest Products Journal*, 2008, vol. 58, no. 10, pp. 78–83.
8. DeBell D.S., Singleton R., Harrington C.A., Gartner B.L. Wood Density and Fiber Length in Young *Populus* Stems: Relation to Clone, Age, Growth Rate, and Pruning. *Wood and Fiber Science*, 2002, vol. 34, no. 4, pp. 529–539.
9. Downes G., Harwood C., Washusen R., Ebdon N., Evans R., White D., Dumbrell I. Wood Properties of *Eucalyptus globulus* at Three Sites in Western Australia: Effects of Fertiliser and Plantation Stocking. *Australian Forestry*, 2014, vol. 77, iss. 3–4, pp. 179–188. <https://doi.org/10.1080/00049158.2014.970742>
10. Downes G.M., Nyakuengama J.G., Evans R., Northway R., Blakemore P., Dickson R.L., Lausberg M. Relationship between Wood Density, Microfibril Angle and Stiffness in Thinned and Fertilized *Pinus radiata*. *IAWA Journal*, 2002, vol. 23, iss. 3, pp. 253–265. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000302>
11. Githiomi J.K., Kariuki J.G. Wood Basic Density of *Eucalyptus grandis* from Plantations in Central Rift Valley, Kenya: Variation with Age, Height Level and between Sapwood and Heartwood. *Journal of Tropical Forest Science*, 2010, vol. 22, no. 3, pp. 281–286.
12. Guler C., Sahin H.I., Aliogullari S. Effect of Spacing on Some Mechanical Properties of Narrow Leaved Ash (*Fraxinus angustifolia*) Wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 773–788. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000067>
13. Harris F.C. *The Effect of Competition on Stand, Tree, and Wood Growth and Structure in Subtropical Eucalyptus grandis Plantations*: PhD Thesis. Australia, New South Wales, Lismore, Southern Cross University, 2007. 193 p.

14. Hosseinzadeh A., Toghraei N., Sheikholeslami A., Sadraei N., Golbabaei F., Hemmati A. Effect of Spacing on Wood Properties and Yield of Two *Populus deltoides* Clones in Safrabasteh (Guilan). *Iranian Journal of Pajouhesh and Sazandegi in Natural Resources*, 1998, vol. 38, no. 1, pp. 45–49 (In Pers.).

15. Hosseinzade J., Abdolkhani A., Emaminasab M., Khodabandehloo H., Ahmadi M. Investigation the Properties of Paper Made from Tension and Normal Wood of *Populus nigra*. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 2015, vol. 30, no. 4, pp. 653–661. (In Pers.).

16. Izekor D.N., Fuwape J.A., Oluyeye A.O. Effects of Density on Variations in the Mechanical Properties of Plantation Grown *Tectona grandis* Wood. *Archives of Applied Science Research*, 2010, vol. 2, no. 6, pp. 113–120.

17. Khan G.S., Chaudhry A.K. Effect of Spacing and Plant Density on the Growth of Poplar (*Populus deltoides*) Trees under Agro-Forestry System. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2007, vol. 44, no. 2, pp. 321–327.

18. Kiaei M., Farsi M. Vertical Variation of Density, Flexural Strength and Stiffness of Persian Silk Wood. *Madera y Bosques*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 169–175.

<https://doi.org/10.21829/myb.2016.221484>

19. Kiaei M. The Effect of Initial Spacing on Wood Density and Biometric Properties of Fibers in *Populus deltoides* (Case Study in Sari Region). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 2018, vol. 24, iss. 4, pp. 101–116.

<https://doi.org/10.22069/JWFST.2018.12631.1656>

20. Kollman F.F.P., Côté W.A. *Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1968. 592 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>

21. Kord B., Kialashaki A., Kord B. The Within-Tree Variation in Wood Density and Shrinkage, and Their Relationship in *Populus euramericana*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2010, vol. 34, no. 2, pp. 121–126. <https://doi.org/10.3906/tar-0903-14>

22. Lei H., Gartner B.L., Milota M.R. Effect of Growth Rate on the Anatomy, Specific Gravity, and Bending Properties of Wood from 7-Year-Old Red Alder (*Alnus rubra*). *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, vol. 27, no. 1, pp. 80–85.

<https://doi.org/10.1139/x96-165>

23. Lima de I.L., Monteiro Borges Florsheim S., Longui E.L. Influência do Espaçamento em Algumas Propriedades Físicas da Madeira de *Tectona grandis* Linn. *Cerne*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 244–250. (In Port.).

24. Machado J.S., Louzada J.L., Santos A.J.A., Nunes L., Anjos O., Rodrigues J., Simões M.S., Pereira H. Variation of Wood Density and Mechanical Properties of Blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). *Materials & Design*, 2014, vol. 56, pp. 975–980.

<http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.016>

25. Mahmud S.Z., Hashim R., Saleh A.H., Sulaiman O., Saharudin N.I., Ngah M.L., Masseat K., Husain H. 2017. Physical and Mechanical Properties of Juvenile Wood from *Neolamarckia cadamba* Planted in West Malaysia. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 225–238. <http://doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000020>

26. Melo L.E. de L., Silva C. de J., Protásio T. de P., Mota G. da S., Santos I.S., Urbina-ti C.V., Trugilho P.F., Mori F.A. Planting Density Effect on Some Properties of *Schizolobium parahyba* Wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 381–394. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005003901>

27. Naji H.R., Nia M.F., Kiaei M., Abdul-Hamid H., Soltani M., Faghihi A. Effect of Intensive Planting Density on Tree Growth, Wood Density and Fiber Properties of Maple (*Acer velutinum* Boiss.). *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2015, vol. 9, iss. 2, pp. 323–329. <https://doi.org/10.3832/ifor1333-008>

28. Naji H.R., Sahri M.H., Nobuchi T., Bakar E.S. Intra- and Interclonal Variation in Anatomical Properties of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. *Wood and Fiber Science*, 2013, vol. 45, no. 3, pp. 268–278.

29. Oladi R., Nasiriani S., Danekar A., Pourtahmasi K. Inter-Relations between Tree-Ring Width and Vessel Features in Black Alder (*Alnus glutinosa*). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 2015, vol. 30, no. 2, pp. 278–288.

<https://doi.org/10.22092/ijwpr.2015.12925>

30. Otoide J.E. Axial and Radial Variations in Wood Density and Moisture of the Trunk of *Azelia africana* Sm. ex Pers. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 2016, vol. 11, iss. 1, ver. II, pp. 61–65.

31. Pande P.K., Massarat A., Uniyal S., Dhiman R.C. Variation in Wood Anatomical Properties and Specific Gravity in Relation to Sexual Dimorphism in *Populus deltoides* Bartr. ex Marsh. *Current Science*, 2012, vol. 102, iss. 11, pp. 1580–1585.

32. Ramezani S., Talaeipour M., Aliabadi M., Tabei A., Bazayr B. Investigation of the Anatomical, Biometry and Chemical Characteristics of Juvenile and Mature Poplar (*Populus alba*) Wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 2013, vol. 28, no. 1, pp. 182–193. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2013.3114>

33. Repola J. Models for Vertical Wood Density of Scots Pine, Norway Spruce and Birch Stems, and Their Application to Determine Average Wood Density. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 4, pp. 673–685. <https://doi.org/10.14214/sf.322>

34. Riahifar N., Fallah A., Mohammadi Samani K., Gorji Mahlebani Y. Comparing the Growth of *Paulownia fortunei* and *Populus deltoides* Plantations under Different Spacing in Northern Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 2009, vol. 16, iss. 3, pp. 444–454.

35. Sidhu D.S., Dhillon G.P.S. Field Performance of Ten Clones and Two Sizes of Planting Stock of *Populus deltoides* on the Indo-Gangetic Plains of India. *New Forests*, 2007, vol. 34, pp. 115–122. <https://doi.org/10.1007/s11056-007-9042-y>

36. Topaloglu E., Ay N., Altun L., Serdar B. Effect of Altitude and Aspect on Various Wood Properties of Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) Wood. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2016, vol. 40, no. 3, pp. 397–406. <https://doi.org/10.3906/tar-1508-95>

37. Topaloglu E., Erisir E. Longitudinal variation in selected properties of oriental beech and Caucasian fir. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 403–416. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005031101>

38. Wimmer R., Downes G.M., Evans R., Rasmussen G., French J. Direct Effects of Wood Characteristics on Pulp and Handsheet Properties of *Eucalyptus globulus*. *Holzfor-schung*, 2005, vol. 56, iss. 3, pp. 244–252. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.040>

39. Yu L., Liang Y., Zhang Y., Cao J. Mechanical Properties of Wood Materials Using Near-Infrared Spectroscopy Based on Correlation Local Embedding and Partial Least-Squares. *Journal of Forestry Research*, 2020, vol. 31, pp. 1053–1060.

<https://doi.org/10.1007/s11676-019-01031-7>

40. Zeidler A. Variation of Wood Density in Turkish Hazel (*Corylus colurna* L.) Grown in the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 2012, vol. 58, iss. 4, pp. 145–151.

<https://doi.org/10.17221/73/2011-JFS>

41. Zhang S.Y., Yu Q., Chauret G., Koubaa A. Selection for Both Growth and Wood Properties in Hybrid Poplar Clones. *Forest Science*, 2003, vol. 49, iss. 6, pp. 901–908.

<https://doi.org/10.1093/forestscience/49.6.901>

42. Zobel B.J., Buijtenen J.P. *Wood Variation: Its Causes and Control*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1989. 363 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5>

43. Zobel B.J. Silvicultural Effects on Wood Properties. *IPEF International*. Brazil, Piracicaba, 1992, pp. 31–38.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 691.113,620.179.161,681.586.48,539.413

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-143-152

Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) ультразвуковыми преобразователями разной частоты

А.С. Королев[✉], канд. техн. наук; *ResearcherID*: [JKI-0714-2023](https://orcid.org/0009-0000-1370-1285),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

Е.С. Шарапов, д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

А.О. Быков, инженер; *ResearcherID*: [KFR-1574-2024](https://orcid.org/0009-0006-3429-5902),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

О.С. Егошин, аспирант; *ResearcherID*: [HLQ-6804-2023](https://orcid.org/0009-0002-8076-8345),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8076-8345>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; korolevas@volgatech.net[✉], sharapoves@volgatech.net, anton_bykov02@mail.ru, egoshin.o.s@mail.ru

Поступила в редакцию 23.08.24 / Одобрена после рецензирования 17.11.24 / Принята к печати 20.11.24

Аннотация. Акустический неразрушающий контроль получил широкое распространение при оценке технического качества и внутреннего состояния древесины в деревянных конструкциях и у растущих деревьях. При этом порода древесины, ее влажность и направление волокон, наличие пороков, а также частота ультразвуковых преобразователей могут оказывать значимое влияние на измерение скорости ультразвукового сигнала в древесине. Развитие приборной базы, а также несогласованность результатов предыдущих исследований послужили основанием для проведения отдельной серии опытов по изучению воздействия частоты ультразвуковых преобразователей на точность косвенного определения плотности, деформативности и прочности древесины при статическом изгибе. Исследования проведены на 176 образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с использованием ультразвуковых приборов Пульсар 2.2 (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) и Pundit PL-200 (Proceq SA, Швейцария) с применением ультразвуковых преобразователей номинальной частотой 24, 54, 60 и 150 кГц. Подтверждено, что частота ультразвуковых преобразователей значимо влияет на скорость сигнала и динамический модуль упругости, а также что плотность древесины не связана со скоростью ультразвукового сигнала. Установлено, что точность прогнозирования модуля упругости и предела прочности древесины при статическом изгибе, оцененная по коэффициенту детерминации ($R^2 = 0,88-0,91$) линейных моделей взаимосвязи данных параметров с динамическим модулем упругости, не зависит от частоты ультразвукового преобразователя. При этом качество моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины по скорости ультразвука значимо ниже по сравнению с параметром динамического модуля упругости. Полученные регрессионные модели могут быть использованы для неразрушающей оценки механических свойств древесины у растущих деревьев сосны и в элементах деревянных конструкций акустическим методом прохождения, а дальнейшие исследования будут направлены на изучение вариабельности акустических параметров древесины сосны у растущих деревьев.

© Королев А.С., Шарапов Е.С., Быков А.О., Егошин О.С., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: динамический модуль упругости, неразрушающий контроль, плотность древесины, прочность древесины, скорость ультразвукового сигнала, ультразвук, ультразвуковой преобразователь

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 23-16-00220, <https://rscf.ru/project/23-16-00220/> с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» ПГТУ, г. Йошкар-Ола.

Для цитирования: Королев А.С., Шарапов Е.С., Быков А.О., Егосин О.С. Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) ультразвуковыми преобразователями разной частоты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 143–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-143-152>

Original article

Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood Using Ultrasonic Transducers of Different Frequencies

Aleksandr S. Korolev[✉], Candidate of Engineering; ResearcherID: [JKI-0714-2023](https://orcid.org/0009-0000-1370-1285),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

Evgenii S. Sharapov, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

Anton O. Bykov, Engineer; ResearcherID: [KFR-1574-2024](https://orcid.org/0009-0006-3429-5902),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

Oleg S. Egoshin, Postgraduate Student; ResearcherID: [HLQ-6804-2023](https://orcid.org/0009-0002-8076-8345),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8076-8345>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; korolevas@volgatech.net[✉], sharapoves@volgatech.net, anton_bykov02@mail.ru, egoshin.o.s@mail.ru

Received on August 23, 2024 / Approved after reviewing on November 17, 2024 / Accepted on November 20, 2024

Abstract. Acoustic non-destructive testing has become widely used in assessing the technical quality and internal condition of wood in wooden structures and growing trees. Meanwhile, the type of wood, its moisture content and grain direction, the presence of defects, as well as the frequency of ultrasonic transducers can have a significant impact on measuring the ultrasonic velocity in wood. The development of the instrumentation base, as well as the inconsistency of the results of previous studies, have served as the basis for conducting a separate series of experiments to study the effect of the frequency of ultrasonic transducers on the accuracy of indirect determination of the density, deformability and strength of wood under static bending. The research has been carried out on 176 samples of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood using ultrasonic devices Pulsar 2.2 (LLC SPE “Interpribor”, Chelyabinsk, Russia) and Pundit PL-200 (Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland) using ultrasonic transducers with nominal frequencies of 24, 54, 60 and 150 kHz. It has been confirmed that the frequency of ultrasonic transducers significantly affects the signal velocity and the dynamic modulus of elasticity, and that the density of wood is not related to the ultrasonic signal velocity. It has been established that the accuracy of predicting the modulus of elasticity and the ultimate strength of wood under static bending, estimated by the coefficient of determination ($R^2 = 0.88–0.91$) of linear models of the relationship between these parameters and the dynamic modulus of elasticity, does not depend on the frequency of the ultrasonic trans-

ducer. At the same time, the quality of models for predicting the physico-chemical properties of wood by the ultrasound velocity is significantly lower compared to the dynamic modulus of elasticity parameter. The obtained regression models can be used for non-destructive evaluation of the mechanical properties of wood in growing pine trees and in the elements of wooden structures by the acoustic transmission method, and further research will be aimed at studying the variability of acoustic parameters of pine wood in growing trees.

Keywords: dynamic modulus of elasticity, non-destructive testing, wood density, wood strength, ultrasonic signal velocity, ultrasound, ultrasonic transducer

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00220, <https://rscf.ru/en/project/23-16-00220/>, using the equipment of the Core Facility Centre “Ecology, Biotechnologies and Processes of Obtaining Environmentally Friendly Energy Carriers”, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

For citation: Korolev A.S., Sharapov E.S., Bykov A.O., Egoshin O.S. Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood Using Ultrasonic Transducers of Different Frequencies. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 143–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-143-152>

Введение

Методы неразрушающего контроля широко используются для определения свойств и внутреннего состояния конструкционных материалов. Перспективным с точки зрения простоты измерений и оценки результатов, широкого распространения приборной базы является акустический метод, основанный на анализе скорости прохождения ультразвукового сигнала через исследуемый объект [1, 9]. Метод может быть использован для косвенного определения деформативности и прочности материалов, глубины раскрытия трещин и обнаружения других внутренних дефектов при оценке качества и технического (санитарного) состояния объектов в таких сферах хозяйственной деятельности как обследование растущих деревьев [14, 20, 25, 26] и строительных конструкций из древесины [6, 7, 18].

Установлена высокая степень корреляции между параметрами скорости ультразвука и динамического модуля упругости древесины с ее механическими свойствами [7–9, 22, 24]. На результаты измерений при этом оказывали значимое влияние порода и влажность древесины [21, 23, 28], направление волокон и пороки древесины [9], а также форма, тип и частота ультразвуковых преобразователей [1, 6, 7, 11, 13, 21].

Использование ультразвуковых преобразователей с частотами 45 и 90 кГц характеризовалось умеренной взаимосвязью ($R = 0,24–0,56$) параметров скорости ультразвукового сигнала с механическими свойствами древесины [19], что было выражено только для образцов из древесины сосны.

Результаты практического применения различных акустических приборов и преобразователей с варьируемыми частотами (45, 75, 90 и 150 кГц) для оценки дефектов в деревянных брусках исторического здания представлены в работе M. Kloiber et al. [12]. Авторами отмечается статистически значимое отличие средних скоростей сигналов, измеренных разными приборами, а наибольшая скорость получена для прибора Fakopp 2D с частотой преобразователей 90 кГц (Fakopp Enterprise Vt., Шопрон, Венгрия). Для определения плотности и поиска скрытых дефектов в древесине и древесных материалах

использовались пьезоэлектрические преобразователи и с более высокими частотами – до 2,5 МГц [4, 5].

Вопрос влияния частоты ультразвуковых преобразователей на скорость сигнала и точность косвенного определения физико-механических свойств древесины не раскрыт исследователями полностью, в т. ч. следует принять во внимание появление на рынке новых отечественных ультразвуковых приборов компании ООО НПП «Интерприбор» (Челябинск, Россия). Целью данной работы являлась оценка воздействия частоты ультразвуковых преобразователей на точность косвенного определения плотности, модуля упругости и предела прочности древесины при статическом изгибе с дальнейшим проецированием результатов на неразрушающий контроль свойств древесины у растущих деревьев, в пиломатериалах и элементах деревянных конструкций.

Объекты и методы исследования

Лабораторные исследования проведены на 176 прямослойных бездефектных образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в форме прямоугольной призмы с поперечным сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 300 мм, изготовленных из заболони и ядра 2 сердцевинных досок и кондиционированных в климатической камере КТХВ-74-70/100 (АО «Смоленское СКТБ СПУ», Смоленск, Россия) при 20 °С/65 % RH до нормализованной влажности. Плотность древесины определяли по ГОСТ 16483.1–84, влажность – по ГОСТ 16483.7–71 сушильно-весовым способом по отдельной партии из 25 образцов. Скорость ультразвукового сигнала рассчитывали по времени его прохождения через образец вдоль волокон. Измерения проводили посредством сухого акустического контакта с расположением ультразвуковых преобразователей согласно схеме, представленной на рис. 1. Установление времени прохождения ультразвукового сигнала осуществлялось в автоматическом режиме по переднему фронту сигнала с использованием приборов Пульсар 2.2 (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) с номинальной частотой преобразователей 60 кГц и Pundit PL-200 (Proseq SA, Шверценбах, Швейцария) с номинальными частотами преобразователей 24, 54 и 150 кГц.

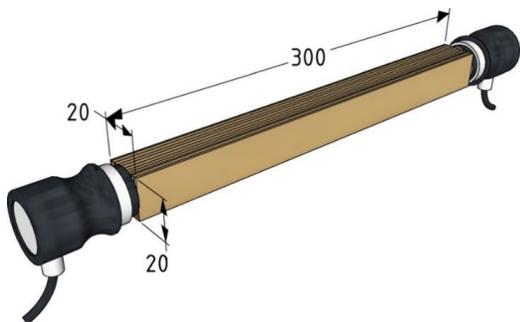


Рис. 1. Схема измерения времени прохождения ультразвукового сигнала вдоль волокон образца древесины

Fig. 1. The diagram of measuring the time of ultrasonic signal passage along the grains of a wood sample

Прогнозирование физико-механических свойств древесины осуществлялось также по динамическому модулю упругости (МПа), который определялся без учета коэффициентов поперечной деформации древесины [15, 27] по формуле [9, 17]

$$E_{\text{дин}} = \rho_{12} V^2,$$

где ρ_{12} – плотность при нормализованной влажности ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$); V – скорость ультразвукового сигнала ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$).

Деформативность и предел прочности древесины при статическом изгибе определяли в соответствии с ГОСТ 16483.3–84 и ГОСТ 16483.9–73 на универсальной испытательной машине УТС-111.2-100-62 (ООО «Тестсистемы», Иваново, Россия) до момента снижения нагрузки более чем на 30 % от максимальной при разрушении образца. Статический модуль упругости измеряли на прямолинейном участке диаграммы усилие-прогиб в пределах 200–700 Н.

Статистическая обработка результатов измерений и расчетов проводилась с использованием программного обеспечения Microsoft Excel (Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США), SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, Калифорния, США) и Statgraphics 19 (Statpoint Technologies Inc., Плейнс, Вирджиния, США). Используемые обозначения оцененных параметров и единиц их измерения следующие: $\sigma_{\text{стат}}$ – предел прочности при статическом изгибе, МПа; $E_{\text{стат}}$ – модуль упругости при статическом изгибе, МПа; V^{60} , V^{24} , V^{54} , V^{150} – скорость ультразвукового сигнала, прибор Пульсар 2.2, 60 кГц, прибор Pundit PL-200, 24, 54, 150 кГц соответственно, м·с⁻¹; $E_{\text{дин}}^{60}$, $E_{\text{дин}}^{24}$, $E_{\text{дин}}^{54}$, $E_{\text{дин}}^{150}$ – динамический модуль упругости, сигнал частотой 60, 24, 54 и 150 кГц соответственно, МПа.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования показали, что все оцениваемые параметры имеют пределы варибельности и особенности распределения в существующей выборке образцов древесины (табл. 1), средняя влажность которых после кондиционирования составляла 10,4 % ($S_x = 0,75$, $CV = 7,2$ %). Наиболее значительно варьировали модуль упругости и предел прочности древесины при статическом изгибе, а также динамический модуль упругости. Плотность древесины, а особенно скорость прохождения в ней ультразвукового сигнала, определяющие динамический модуль упругости, варьировали гораздо слабее.

Таблица 1

Варибельность оцениваемых параметров в исследованной выборке образцов
The variability of the evaluated parameters in the studied sample set

Параметр	$M \pm m$	X_{\min}	X_{\max}	S_x	CV	$A_{\text{ст}}$	$E_{\text{ст}}$	Однородность средних
$\sigma_{\text{стат}}$	79,4 ± 0,8	50,3	102	10,0	12,7	-0,78	0,01	–
$E_{\text{стат}}$	10354 ± 106	6827	13363	1412	13,6	-0,87	0,88	–
$E_{\text{дин}}^{60}$	12812 ± 127	8670	16438	1695	13,2	-0,42	-2,00	<i>C</i>
$E_{\text{дин}}^{24}$	12921 ± 146	8764	16957	1932	14,9	0,64	-2,19	<i>C</i>
$E_{\text{дин}}^{54}$	12894 ± 119	8898	16500	1582	12,2	-0,58	-1,89	<i>CD</i>
$E_{\text{дин}}^{150}$	13384 ± 135	8979	17481	1794	13,4	-0,20	-1,79	<i>D</i>
ρ_{12}	467,4 ± 3,0	394	548	40,0	8,5	1,19	-3,04	–
V^{60}	5226 ± 16,8	4486	5615	223,8	4,3	-4,08	0,77	<i>A</i>
V^{24}	5244 ± 18,9	4545	5714	251,4	4,8	-2,21	-1,06	<i>A</i>
V^{54}	5247 ± 17,9	4508	5695	238,5	4,6	-3,51	0,62	<i>A</i>
V^{150}	5342 ± 18,1	4560	5753	240,8	4,5	-3,58	0,35	<i>B</i>

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение параметра и его ошибка; X_{\min} , X_{\max} – минимальное и максимальное значения параметра; S_x – стандартное отклонение параметра; CV – коэффициент вариации, %; $A_{\text{ст}}$ – стандартизованная асимметрия; $E_{\text{ст}}$ – стандартизированный эксцесс.

Множественное сравнение средних (по критерию Тьюки) [2] показателей выборок скорости и динамического модуля упругости, полученных с применением ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты, выявило значимые различия. Так, скорость прохождения ультразвукового сигнала вдоль волокон древесины, полученная посредством преобразователей с номинальной частотой 60, 24, 54 кГц значимо отличалась от скорости, полученной с использованием преобразователя с частотой 150 кГц, что согласуется с результатами исследований [1, 13]. Схожий результат относится и к динамическому модулю упругости, средние значения которого с использованием преобразователей 150 кГц значимо отличались от показателей, полученных при частотах 24, 60 кГц. Данный итог обусловлен увеличением скорости ультразвуковых колебаний при росте ее частоты [13].

Для оценки точности ультразвуковых преобразователей в табл. 2 приведены коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи скорости и динамического модуля упругости вдоль волокон древесины, измеренные при помощи ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты, с плотностью, пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе.

Таблица 2

Коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи плотности, предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе со скоростью ультразвукового сигнала и динамическим модулем упругости
The coefficients of determination of linear models of the relationship between density, ultimate strength and modulus of elasticity under static bending with the ultrasonic signal velocity and the dynamic modulus of elasticity

	V^{60}	V^{24}	V^{54}	V^{150}	$E_{\text{дин}}^{60}$	$E_{\text{дин}}^{24}$	$E_{\text{дин}}^{54}$	$E_{\text{дин}}^{150}$
ρ	0,05	0,14	0	0,03	0,61	0,64	0,45	0,57
$\sigma_{\text{стат}}$	0,38	0,48	0,20	0,36	0,74	0,73	0,69	0,73
$E_{\text{стат}}$	0,59	0,68	0,36	0,55	0,91	0,88	0,88	0,90

Выявлено отсутствие взаимосвязи плотности древесины сосны со скоростью ультразвукового сигнала. Это согласовывается с ранее полученными данными на образцах древесины и растущих деревьях [20, 21]. Заметная корреляционная связь ($R^2 = 0,55-0,68$) выявлена между скоростью ультразвукового сигнала, полученной с помощью преобразователей с частотами 24, 60 и 150 кГц, и модулем упругости при статическом изгибе, умеренная связь ($R^2 = 0,36-0,48$) – с пределом прочности древесины при статическом изгибе. При использовании преобразователя номинальной частотой 54 кГц установлена наименьшая степень взаимосвязи скорости ультразвукового сигнала с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе.

Точность оценок предела прочности ($R^2 = 0,69-0,74$) и модуля упругости ($R^2 = 0,88-0,91$) при статическом изгибе по связи с динамическим модулем упругости, как оказалось, не зависит от номинальной частоты ультразвукового преобразователя и при этом имеет высокую взаимосвязь с данными параметрами. Достоверность разности коэффициентов детерминации определялась как достоверность разности средних по критерию Стьюдента по крайним значениям из 4 выборок.

Результаты регрессионного анализа сопряженности значений динамического модуля упругости вдоль волокон, полученных с применением ультразвуковых преобразователей с номинальными частотами 24, 54, 60 и 150 кГц, с пределом прочности и модулем упругости при статическом изгибе представлены на рис. 2 и в табл. 3.

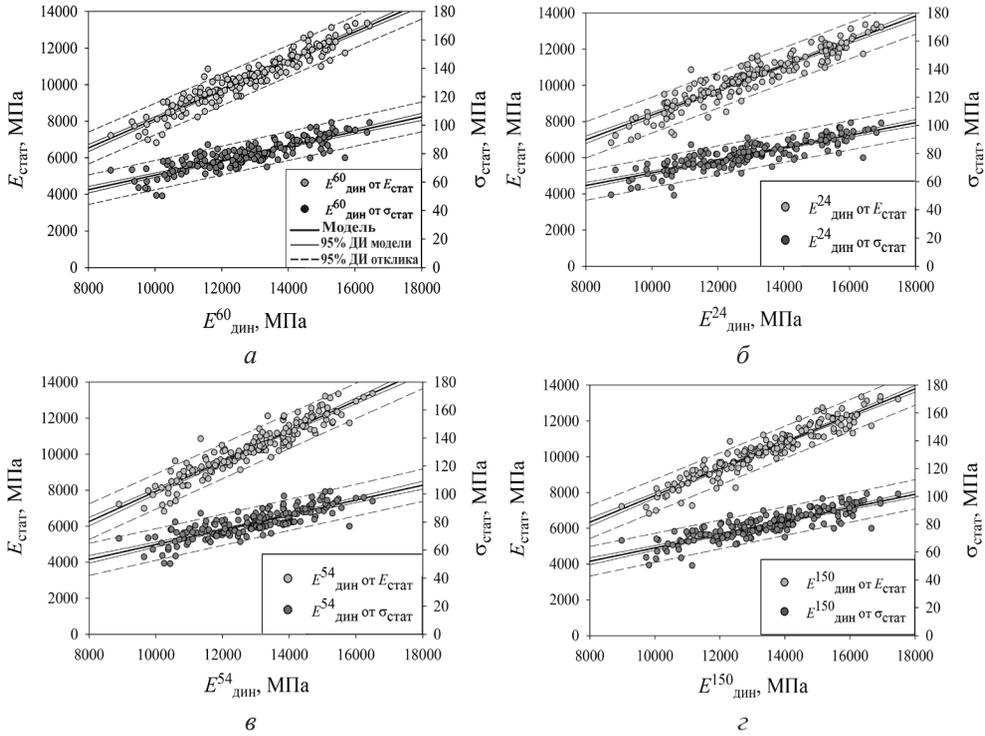


Рис. 2. Регрессионные модели взаимосвязи предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе с динамическим модулем упругости, полученным при применении ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты (ДИ – доверительный интервал)

Fig. 2. The regression models of the relationship between the ultimate strength and modulus of elasticity under static bending with the dynamic modulus of elasticity obtained using ultrasonic transducers of various nominal frequencies: (ДИ – the confidence interval)

Таблица 3

Регрессионные модели связи предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе с динамическим модулем упругости, полученным при применении ультразвуковых преобразователей разной номинальной частоты
The regression models of the relationship between the ultimate strength and modulus of elasticity under static bending with the dynamic modulus of elasticity obtained using ultrasonic transducers of various nominal frequencies

Регрессионная модель	Обозначение на рис. 2	R ²	SEE
$E_{\text{стат}} = 0,793E_{\text{дин}}^{60} + 193,53^*$	а	0,91	432,60
$\sigma_{\text{стат}} = 0,005E_{\text{дин}}^{60} + 13,71$			
$E_{\text{стат}} = 0,684E_{\text{дин}}^{24} + 1513,55$	б	0,88	498,20
$\sigma_{\text{стат}} = 0,00447E_{\text{дин}}^{60} + 21,59$			

Окончание табл. 3

Регрессионная модель	Обозначение на рис. 2	R ²	SEE
$E_{\text{стат}} = 0,838E_{\text{дин}}^{54} - 450,38^*$	6	0,88	488,90
$\sigma_{\text{стат}} = 0,005E_{\text{дин}}^{54} + 11,05$		0,69	5,65
$E_{\text{стат}} = 0,746E_{\text{дин}}^{150} - 370,97^*$	2	0,90	452,90
$\sigma_{\text{стат}} = 0,00482E_{\text{дин}}^{150} + 14,86$		0,73	5,23

Примечание: R² – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации. *Незначимые коэффициенты модели.

Полученные регрессионные модели с высокой точностью прогнозируют модуль упругости, предел прочности и предел прочности древесины сосны при статическом изгибе и могут быть использованы для оценки ее технического качества у растущих деревьев, в пиломатериалах и элементах деревянных конструкций. Плотность древесины при этом устанавливается косвенными неразрушающими методами контроля на образцах незначительного объема по кернам [3] или образцам стружки [7], а также измерением сопротивления сверлению [10, 16, 19] с учетом влияния влажности на скорость прохождения сверла в древесину и плотности древесины.

Заключение

Установлено, что частота ультразвуковых преобразователей устройств Пульсар 2.2 и Pundit PL-200 не оказывает значимого влияния на точность косвенного определения модуля упругости и предела прочности древесины сосны при статическом изгибе по динамическому модулю упругости. Вместе с тем максимальный коэффициент детерминации для линейных моделей взаимосвязи деформативности (R² = 0,91) и предела прочности при статическом изгибе (R² = 0,74) с динамическим модулем упругости установлен для ультразвукового прибора Пульсар 2.2 с частотой преобразователей 60 кГц. Прогнозирование механических свойств древесины по скорости ультразвука значимо уступает по качеству моделям, основанным на параметре динамического модуля упругости, при этом подтверждено отсутствие сопряженности скорости ультразвука с плотностью древесины. Полученные регрессионные модели могут быть применены для неразрушающей оценки механических свойств древесины у растущих деревьев и в элементах деревянных конструкций при использовании акустического метода прохождения и определении динамического модуля упругости. Плотность древесины при этом следует установить, например, при использовании кернов из растущего дерева, лесоматериала, пиломатериала или изделия. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение вариабельности акустических параметров древесины сосны у растущих деревьев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бобылева Ю.Н., Давыдов С.Л., Зарецкий-Феоктистов Г.Г. К вопросу об определении упругих параметров древесины ультразвуковым методом // Изв. вузов. Лесн. журн. 1978. № 3. С. 156–159.

Bobyleva Yu.N., Davydov S.L., Zaretskij-Feoktistov G.G. On the Issue of Determining the Elastic Parameters of Wood Using the Ultrasonic Method. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1978, no. 3, pp. 156–159. (In Russ.).

2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Kobzar A.I. *Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Scientists*. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 816 p. (In Russ.).

3. Колесникова А.А. Исследование свойств древесины по кернам: Научное издание. Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т, 2002. 178 с.

Kolesnikova A.A. *The Study of Wood Properties Based on Core Samples: Scientific Publication*. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University Publ., 2002. 178 p. (In Russ.).

4. Лакатощ Б.К. Дефектоскопия древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 182 с.

Lakatosh B.K. *Wood Flaw Detection*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 182 p. (In Russ.).

5. Федяев А.А., Чубинский А.Н. Неразрушающие методы контроля свойств продукции из древесины. СПб.: ГАЛАНИКА, 2022. 118 с.

Fedyayev A.A., Chubinskij A.N. *Non-Destructive Methods of Testing the Properties of Wood Products*. St. Petersburg, GALANIKA Publ., 2022. 118 p. (In Russ.).

6. Arriaga F., Llana D.F., Esteban M., Íñiguez-González G. Influence of Length and Sensor Positioning on Acoustic Time-of-Flight (ToF) Measurement in Structural Timber. *Holzforschung*, 2017, vol. 71, iss. 9, pp. 713–723. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>

7. Arriaga F., Osuna-Sequera C., Bobadilla I., Esteban M. Prediction of the Mechanical Properties of Timber Members in Existing Structures Using the Dynamic Modulus of Elasticity and Visual Grading Parameters. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 322, art. no. 126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>

8. Baar J., Tippner J., Rademacher P. Prediction of Mechanical Properties – Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity – of Five Tropical Species by Nondestructive Methods. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 239–252.

<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>

9. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2006. 394 p.

<https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

10. Downes G.M., Lausberg M., Potts B.M., Pilbeam D.L., Bird M., Bradshaw B. Application of the IML Resistograph to the Infield Assessment of Basic Density in Plantation Eucalypts. *Australian Forestry*, 2018, vol. 81, iss. 3, pp. 177–185.

<https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676>

11. Kang H., Booker R.E. Variation of Stress Wave Velocity with MC and Temperature. *Wood Science and Technology*, 2002, vol. 36, pp. 41–54.

<https://doi.org/10.1007/s00226-001-0129-x>

12. Kloiber M., Reinprecht L., Hrivnák J., Tippner J. Comparative Evaluation of Acoustic Techniques for Detection of Damages in Historical Wood. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, vol. 20, pp. 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.009>

13. Kohlhauser C., Hellmich C., Vitale-Brovarene C., Boccaccini A.R., Rota A., Eberhardsteiner J. Ultrasonic Characterisation of Porous Biomaterials Across Different Frequencies. *Strain*, 2009, vol. 45, iss. 1, pp. 34–44. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00417.x>

14. Llana D.F., Short I., Harte A.M. Use of Non-Destructive Test Methods on Irish Hardwood Standing Trees and Small-Diameter Round Timber for Prediction of Mechanical Properties. *Annals of Forest Science*, 2020, vol. 77, art. no. 62.

<https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x>

15. Mora C.R., Schimleck L.R., Isik F., Mahon J.M., Clark A., Daniels R.F. Relationships between Acoustic Variables and Different Measures of Stiffness in Standing *Pinus taeda* Trees. *Canadian Journal of Research*, 2009, vol. 39, no. 8, pp. 1421–1429.

<https://doi.org/10.1139/X09-062>

16. Nowak T.P., Jasięńko J., Hamrol-Bielecka K. In situ Assessment of Structural Timber Using the Resistance Drilling Method – Evaluation of Usefulness. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 102, part 1, pp. 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.004>

17. Proto A.R., Macri G., Bernardini V., Russo D., Zimbalatti G. Acoustic Evaluation of Wood Quality with a Non-Destructive Method in Standing Trees: a First Survey in Italy. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2017, vol. 10, iss. 4, pp. 700–706.

<https://doi.org/10.3832/ifer2065-010>

18. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: a Review. *General Technical Report FPL, GTR-70*. US Department of Agriculture, Forest Service, 1994. 39 p. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-70>

19. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Prediction of Modulus of Elasticity in Static Bending and Density of Wood at Different Moisture Contents and Feed Rates by Drilling Resistance Measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, vol. 77, pp. 833–842. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2>

20. Sharapov E., Demakov Yu., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forests*, 2024, vol. 15, no. 2, art. no. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>

21. Tippner J., Hrivnák J., Kloiber M. Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood Using Acoustic Methods. *BioResources*, 2016, vol. 11, iss. 1, pp. 503–518. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.503-518>

22. Vázquez C., Gonçalves R., Bertoldo C., Baño V., Vega A., Crespo J., Guaita M. Determination of the Mechanical Properties of *Castanea sativa* Mill. Using Ultrasonic Wave Propagation and Comparison with Static Compression and Bending Methods. *Wood Science and Technology*, 2015, vol. 49, pp. 607–622. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0719-7>

23. Wang S.-Y., Chuang S.-T. Experimental Data Correction of the Dynamic Elastic Moduli, Velocity and Density of Solid Wood as a Function of Moisture Content above the Fiber Saturation Point. *Holzforschung*, 2000, vol. 54, iss. 3, pp. 309–314. <https://doi.org/10.1515/HF.2000.052>

24. Wang S.-Y., Lin C.-J., Chiu C.-M. The Adjusted Dynamic Modulus of Elasticity Above the Fiber Saturation Point in Taiwan Plantation Wood by Ultrasonic-Wave Measurement. *Holzforschung*, 2003, vol. 57, iss. 5, pp. 547–552. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.081>

25. Wang X. Acoustic Measurements on Trees and Logs: a Review and Analysis. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, pp. 965–975. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0552-9>

26. Wang X., Ross R.J., McClellan M., Barbour J., Erickson J.R., Forsman J.W., McGinnis G.D. Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique. *Research Paper FPL, RP-585*. US Department of Agriculture, Forest Service, 2000. 9 p.

27. Wang X., Ross R.J., Carter P. Acoustic Evaluation of Wood Quality in Standing Trees. Part I. Acoustic Wave Behavior. *Wood and Fiber Science*, 2007, vol. 39, no. 1, pp. 28–38.

28. Yang H., Yu L., Wang L. Effect of Moisture Content on the Ultrasonic Acoustic Properties of Wood. *Journal of Forestry Research*, 2015, vol. 26, pp. 753–757.

<https://doi.org/10.1007/s11676-015-0079-z>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Вклад авторов: Методология: Королев А.С. и Шарпов Е.С., измерения: Королев А.С., Быков А.О. и Егوشин О.С., обработка, графическое представление данных: Королев А.С. и Шарпов Е.С., подготовка рукописи: Королев А.С. и Шарпов Е.С., научное руководство: Шарпов Е.С.

Authors' Contribution: Conceptualization and methodology Korolev A.S. and Sharapov E.S., laboratory tests Korolev A.S., Bykov A.O. and Egoshin O.S., processing of results and graphical presentation Korolev A.S. and Sharapov E.S., writing–review and editing Korolev and A.S., Sharapov E.S., supervision Sharapov E.S.



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 674.8:663.15

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-153-168

Ферментативный гидролиз арабиногалактана древесины лиственницы сибирской

А.Р. Галиева¹, ассистент; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9562-0871>

Е.В. Крякунова¹, канд. биол. наук; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>

Л.А. Мингазова¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAO-9184-2020](https://orcid.org/0000-0003-3289-3977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>

З.А. Канарская¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

А.В. Канарский¹ , д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

А.Г. Кузнецов², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AEX-1353-2022](https://orcid.org/0000-0003-1476-1065),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1476-1065>

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; af.signal@mail.ru, Oscillatoria@rambler.ru, leisan1@mail.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru, alb46@mail.ru 

²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;

anton.kuznetsov@hotmail.com

Поступила в редакцию 28.03.25 / Одобрена после рецензирования 16.06.25 / Принята к печати 17.06.25

Аннотация. При получении целлюлозы из растительного сырья образуются вторичные ресурсы в виде гидролизатов полисахаридов и лигнина, которые могут выступать субстратом в микробиотехнологии для производства биопродуктов. К экономически привлекательным субстратам для культивирования микроорганизмов следует отнести и арабиногалактан, переходящий по действующей технологии в щелок при получении целлюлозы из древесины лиственницы. Разработана и технология варки целлюлозы древесины лиственницы с предварительной экстракцией арабиногалактана горячей водой, что делает его доступным в качестве сырья для микробиологии. Однако не все микроорганизмы обладают необходимыми ферментами для расщепления данного субстрата, поэтому для повышения биодоступности арабиногалактан необходимо подвергнуть предварительному каталитическому, предпочтительно ферментативному, гидролизу, который является более экологически безопасным по сравнению с химическим гидролизом. Данная работа посвящена исследованию потенциала использования β-галактозидазного ферментного комплекса *Rhizopus oryzae* F-1030 для биodeградации арабиногалактана. Показана способность гриба метаболизировать и ассимилировать арабиногалактан как единственный источник углерода. Установлено, что увеличение биомассы гриба находится в прямой зависимости от концентрации арабиногалактана

© Галиева А.Р., Крякунова Е.В., Мингазова Л.А., Канарская З.А., Канарский А.В., Кузнецов А.Г., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

в среде. Подбор рациональных условий инкубирования внеклеточной β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 после удаления из культуральной жидкости биомассы гриба позволил достичь эффективного уровня расщепления арабиногалактана с обогащением среды редуцирующими веществами, представленными простыми сахарами. Установлено, что β -галактозидаза *R. oryzae* F-1030 при температуре 60 °С, pH 7,0±0,2, наличии постоянного перемешивания проявляет высокую ферментативную активность при всех исследованных концентрациях арабиногалактана. Отмечено, что в первые 3 сут. инкубирования происходит основной прирост концентрации редуцирующих веществ в среде культивирования, тогда как в последующем увеличения содержания редуцирующих веществ почти не наблюдается вследствие истощения доступных для гидролиза ферментом β -галактозидазой связей в молекулах арабиногалактана, а также из-за возможного взаимодействия фермента с продуктами реакции. Доказано, что активность фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 находится в прямой зависимости от концентрации арабиногалактана и температуры среды культивирования. Полученные результаты позволяют рассматривать β -галактозидазу *R. oryzae* F-1030 в качестве перспективного фермента для биомодификации арабиногалактана и для совместного применения как фермента, так и арабиногалактана в кормовой промышленности.

Ключевые слова: арабиногалактан, *Rhizopus oryzae*, β -галактозидаза, ферментативный гидролиз, простые сахара, редуцирующие вещества

Для цитирования: Галиева А.Р., Крякунова Е.В., Мингазова Л.А., Канарская З.А., Канарский А.В., Кузнецов А.Г. Ферментативный гидролиз арабиногалактана древесины лиственницы сибирской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 153–168. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-153-168>

Original article

Enzymatic Hydrolysis of Arabinogalactan from Siberian Larch Wood

*Aigul R. Galieva*¹, Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9562-0871>

*Elena V. Kryakunova*¹, Candidate of Biology; ResearcherID: [Z-3038-2019](https://orcid.org/0000-0003-4563-9847),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4563-9847>

*Leysan A. Mingazova*¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAO-9184-2020](https://orcid.org/0000-0003-3289-3977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3289-3977>

*Zosya A. Kanarskaya*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

*Albert V. Kanarsky*¹✉, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

*Anton G. Kuznetsov*², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AEX-1353-2022](https://orcid.org/0000-0003-1476-1065),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1476-1065>

¹Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; af.signal@mail.ru, Oscillatoria@rambler.ru, leisan1@mail.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru, alb46@mail.ru✉

²Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernetkh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; anton.kuznetsov@hotmail.com

Received on Marth 28, 2025 / Approved after reviewing on June 16, 2025 / Accepted on June 17, 2025

Abstract. When pulp is obtained from plant raw materials, secondary resources are formed represented by hydrolysates of polysaccharides and lignin, which can act as a substrate in microbiotechnology for the production of bioproducts. Arabinogalactan, which is converted into liquor by the current technology during the production of pulp from larch wood, should also be considered an economically attractive substrate for cultivating microorganisms. A technology for cooking larch wood pulp with pre-extraction of arabinogalactan with hot water has also been developed, making it available as a raw material for microbiology. However, not all microorganisms possess the necessary enzymes to break down this substrate, therefore, in order to increase the bioavailability, arabinogalactan must be subjected to preliminary catalytic, preferably enzymatic, hydrolysis, which is more environmentally friendly compared to chemical hydrolysis. This work is devoted to the investigation of the potential of using the β -galactosidase enzyme complex *Rhizopus oryzae* F-1030 for the biodegradation of arabinogalactan. The ability of the fungus to metabolize and assimilate arabinogalactan as a sole carbon source has been demonstrated. It has been established that the increase in fungal biomass is directly dependent on the concentration of arabinogalactan in the medium. The selection of rational incubation conditions for extracellular β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 after the removal of fungal biomass from the culture fluid has made it possible to achieve an effective level of arabinogalactan cleavage with enrichment of the medium with reducing substances represented by simple sugars. It has been established that β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 at a temperature of 60 °C, pH 7.0 \pm 0.2 and constant stirring exhibits high enzymatic activity at all arabinogalactan concentrations studied. It has been noted that during the first 3 days of incubation, the main increase in the concentration of reducing substances in the culture medium occurs, whereas subsequently, almost no increase in the content of reducing substances is observed due to the depletion of bonds in arabinogalactan molecules available for hydrolysis by the β -galactosidase enzyme, as well as due to the possible interaction of the enzyme with the reaction products. It has been proven that the activity of the β -galactosidase enzyme *R. oryzae* F-1030 is directly dependent on the concentration of arabinogalactan and the temperature of the culture medium. The results obtained allow us to consider β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 as a promising enzyme for the biomodification of arabinogalactan and for the combined use of both the enzyme and arabinogalactan in the feed industry.

Keywords: arabinogalactan, *Rhizopus oryzae*, β -galactosidase, enzymatic hydrolysis, simple sugars, reducing substances

For citation: Galieva A.R., Kryakunova E.V., Mingazova L.A., Kanarskaya Z.A., Kanarsky A.V., Kuznetsov A.G. Enzymatic Hydrolysis of Arabinogalactan from Siberian Larch Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 153–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-153-168>

Введение

Рациональное использование природных ресурсов должно основываться на комплексной переработке сырья. В этом контексте растительное сырье представляет собой особо ценный ресурс – возобновляемый и почти неисчерпаемый, что открывает широкие перспективы для его промышленной переработки. Биомасса растений представлена в основном полисахаридами, гидролитическая обработка которых позволяет получать множество моносахаридов, обладающих большим потенциалом для дальнейшей переработки и использования в различных отраслях промышленности [2]. Гидролиз полисахаридов растительного происхождения в основном осуществляется ферментативными методами, т. к. при высоком содержании сухих веществ субстрата ферментативный гидролиз предпочтительнее кислотного из-за специфичности действия

ферментов, низких температур протекания процесса, значительного выхода искомого продукта при отсутствии вторичных превращений моносахаридов. С экономической и экологической точки зрения ферментативный гидролиз также выгоднее кислотного [21, 25, 27, 36].

Основным продуктом гидролиза растительных полисахаридов являются редуцирующие вещества (РВ), представленные смесью разных сахаров и несхаристых веществ, имеющих альдегидную или кетонную группу в составе молекулы. К РВ растительного сырья относят моносахариды (глюкоза, манноза, галактоза, фруктоза, ксилоза), фурфурол, уроновые кислоты, декстрины (дисахариды, полученные при неполном гидролизе клетчатки или гемицеллюлоз – лактоза, мальтоза, целлобиоза), лигносульфоновые кислоты, гуминовые вещества [7].

Арабиногалактаны – широко распространенные в растительном мире полисахариды. Арабиногалактаны содержатся в клеточной оболочке как в свободном состоянии, так и в виде мономерной единицы макромолекулы пектиновых веществ, либо как моносахаридный остаток балластных полисахаридов: камедей, гемицеллюлоз [3, 14, 25, 26, 28, 29]. Химически чистый арабиногалактан лиственницы представляет собой белый или почти белый порошок без выраженного запаха. Технический арабиногалактан, выделяемый из древесины лиственницы предварительной экстракцией горячей водой при ее промышленной переработке, – это смесь различных водорастворимых компонентов, поэтому его гидрофильный порошок имеет бледно-кремовый цвет и обладает слабым хвойным запахом. Арабиногалактан – химически стабильное соединение, устойчивое к низким рН, нагреванию и гидролизу. Он обладает бактерицидными, иммуностимулирующими, общетонизирующими свойствами, способствует восстановлению нормобиоценоза желудочно-кишечного тракта. Названные свойства арабиногалактана способствуют его широкому применению в фармацевтической и пищевой промышленности для изготовления пребиотиков и функциональных продуктов питания [5, 23–25, 32, 33, 38, 40]. Недавние исследования показали перспективу применения арабиногалактана, модифицированного с помощью ди- и трикарбокислых кислот, в качестве основы для экологических и биологически разлагаемых пленок, которые могут применяться в упаковочной и биомедицинской областях [31]. В животноводстве арабиногалактан используют для увеличения прироста живой массы, удоев молока и повышения резистентности организма к различным заболеваниям вследствие нормализации обмена веществ и оптимизации работы антиоксидантной системы, в результате чего повышаются адаптивные возможности организмов животных. Введение в рационы молодняка сельскохозяйственных животных и птицы арабиногалактана способствует интенсификации прироста биомассы вследствие повышения усвояемости корма и улучшения его конверсии посредством увеличения содержания в желудочно-кишечном тракте животных бифидобактерий и лактобацилл [13, 18, 19].

Мировой рынок арабиногалактана стабильно растет, что обусловлено ростом спроса на пищевые и кормовые добавки, фармацевтические препараты и функциональные продукты питания, стимулированным интересом потребителей к натуральным пребиотикам и модуляторам иммунной системы. При изготовлении кормов для животных используются кормовые добавки, полученные методом ферментации микроорганизмов на питательных средах на основе арабиногалактана [23].

Известно, что источником углерода, необходимым для набора биомассы и физиологической активности микроорганизмов, являются простые сахара – продукты гидролиза полисахаридов. Однако далеко не все микроорганизмы имеют необходимые ферменты для гидролиза арабиногалактана до простых сахаров, поэтому было бы нецелесообразно использовать интактный арабиногалактан в составе микробиологической питательной среды. Ферментом, ответственным за расщепление сложных углеводов до простых сахаров, хорошо усваиваемых всеми микроорганизмами, является β -галактозидаза (β -D-галактогидролаза), катализирующая реакции гидролиза и трансгалактозилирования олигосахаров по гликозидной связи (1-3 галактопиранозная связь и 1-6 арабинофуранозная боковая связь в арабиногалактане) [10]. Фермент β -галактозидаза продуцируется бактериями р. *Escherichia*, *Lactobacillus*, мицелиальными грибами р. *Aspergillus*, некоторыми представителями дрожжеподобных грибов и т. д. Микробные β -галактозидазы в настоящее время широко используются в биотехнологических производствах и пищевой промышленности, т. к. данный фермент способен гидролизовать лактозу. Этот фермент также может быть использован в биосинтезе галактоолигосахаридов – неперевариваемых олигосахаридов, способствующих росту полезной кишечной микрофлоры [30, 34, 39].

В зависимости от происхождения β -галактозидазы условно подразделяют на внутриклеточные и внеклеточные. Например, β -галактозидазы, полученные из мицелиальных грибов р. *Aspergillus* и *Rhizopus*, являются внеклеточными ферментами, тогда как большинство бактериальных β -галактозидаз – внутриклеточные ферменты. Структурно-механические и кинетические свойства β -галактозидазы зависят от происхождения фермента. Например, внеклеточная β -галактозидаза – гликопротеин с молекулярной массой 115–176 кДа, субъединичной структуры не имеет, не активируется металлами, характеризуется оптимальным рН 3,6–5,3. Внеклеточная β -галактозидаза более стабильна, но менее активна, чем внутриклеточная β -галактозидаза дрожжей и бактерий [17].

Соответственно, поиск продуцентов внеклеточной β -галактозидазы среди мицелиальных грибов для культивирования на субстратах-индукторах из арабиногалактана является актуальной проблемой. Проводимые исследования обосновывают целесообразность получения биопродуктов кормового назначения на основе арабиногалактана с содержанием ферментов и редуцирующих веществ.

Цель исследования – изучение возможности биodeградации технического арабиногалактана ферментной системой мицелиального гриба *Rhizopus oryzae* F-1030.

Задачи: определение возможности использования арабиногалактана в качестве источника углерода в составе питательных сред для культивирования мицелиального гриба *R. oryzae* F-1030; подбор условий инкубирования внеклеточной β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 для максимальной биоконверсии арабиногалактана и обогащения культуральной жидкости редуцирующими веществами.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служил мицелиальный гриб *R. oryzae* штамм ВКПМ F-1030. Штамм был предоставлен Всероссийской коллекцией про-

мышленных микроорганизмов. Первоначально выращивание биомассы гриба *R. oryzae* F-1030 осуществлялось твердофазным культивированием музейной культуры на картофельно-глюкозном агаре при температуре 28–30 °С в течение 7 сут. Картофельно-глюкозный агар содержал 200 г мелкоизмельченных клубней картофеля, 20 г глюкозы, 20 г бактериологического агара на 1000 см³ воды. Стерилизацию питательных сред проводили автоклавированием при температуре 115 °С в течение 60 мин.

Основой питательной среды для последующего культивирования гриба служил технический арабиногалактан в концентрации 2, 4 и 6 %. Арабиногалактан был предоставлен Санкт-Петербургским государственным университетом промышленных технологий и дизайна, кафедрой Технологии целлюлозы и композиционных материалов. Используемый арабиногалактан – порошок с содержанием сухих веществ 92 %, полученный путем сушки на распылительной сушилке экстракта технологической щепы древесины лиственницы сибирской (Братский лесопромышленный комплекс) [4, 6, 10, 11]. Экстракт был получен 2-ступенчатой водной экстракцией при температуре 90–105 °С при гидромодуле 1:4, после чего дополнительно сконцентрирован с применением мембранной фильтрации до концентрации 25 %. Качественный анализ состава порошка показал присутствие незначительного количества олигосахаридов, прошедших через ультрафильтрационную мембрану, а также наличие дигидрокверцетина, низкомолекулярных фенольных соединений и танинов. Количественный состав компонентов данного образца не изучался, однако компонентный состав водных экстрактов древесины лиственницы той же лесосырьевой базы известен [16]. Сухой остаток экстрактов представляет собой смесь полисахаридов (94–97 % арабиногалактана и 3–6 % пектиновых веществ), дигидрокверцетина (3,2–4,0 %) и танинов (3,6–4,6 %). Кроме того, в количестве 1,7–3,2 % присутствуют минеральные вещества и фенолокислоты.

Засев питательной среды на основе арабиногалактана проводился внесением в питательную среду части мицелия *R. oryzae* F-1030 в вегетативной фазе роста в массовом соотношении 1:500. Глубинное культивирование гриба осуществлялось в колбах Эрленмейера объемом 250 см³ при температуре 28±2 °С и непрерывном перемешивании в течение 7 сут. В культуральной жидкости контролировали рН, температуру, содержание редуцирующих веществ (РВ). Отбор проб проводили каждые 24 ч.

В питательные среды вносили минеральные соли $\text{KН}_2\text{PО}_4$ и $(\text{NН}_4)_2\text{SО}_4$ в следующих концентрациях: при добавлении в питательную среду, в которой содержалось 2 % арабиногалактана, 0,3 сМ $(\text{NН}_4)_2\text{SО}_4$ и 0,1 сМ $\text{KН}_2\text{PО}_4$; 4 % – 0,6 и 0,3 сМ; 6 % – 1,0 и 0,6 сМ.

Расчет количества вносимых в питательную среду солей осуществляли из расчета содержания редуцирующих веществ (РВ) в питательной среде.

Содержание РВ определяли по методике, приведенной в работе [12].

По истечении 7 сут. культивирования мицелий гриба *R. oryzae* F-1030 отделяли от культуральной жидкости центрифугированием на центрифуге СМ-12 при 4000 об./мин. в течение 40 мин. В культуральной жидкости определяли активность внеклеточного фермента β-галактозидазы фотометрическим методом с применением О-нитрофенил-β-D-галактопиринозида [15].

Культуральную жидкость смешивали в соотношении 1:1 со стерильной средой, содержащей арабиногалактан. Смесь термостатировали при 50 или

60 °С при постоянном перемешивании. Ежедневно в смеси в течение последующих 7 сут. определяли активность β -галактозидазы.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью программы Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Субстрат для промышленного культивирования микроорганизмов должен иметь не только сбалансированный состав (источники углерода, азота, воды), обеспечивающий веществом и энергией процессы роста и обмена веществ конкретного микроорганизма, но и быть экономически доступным и экологически безопасным. Арабиногалактан, представляющий собой вторичный ресурс, получаемый при производстве целлюлозы из древесины лиственницы, может рассматриваться в качестве перспективного недорогого источника углерода для промышленного культивирования микроорганизмов. Известно, что мицелиальные грибы способны к усвоению сложных источников углеводов растительного происхождения, в частности, арабиногалактана, таким образом участвуя в биоконверсии отходов переработки древесины [10, 35].

В предыдущих работах авторов была показана способность данного гриба использовать в качестве источника углерода щелока – вторичные ресурсы целлюлозно-бумажной промышленности [8, 9]. В данной работе рассматривается возможность использования арабиногалактана в качестве основы питательной среды для культивирования гриба *R. oryzae* F-1030. Арабиногалактан представляет собой гидрофильный полисахарид, состоящий из мономеров простых сахаров арабинозы и галактозы, которые могут ассимилироваться грибом в качестве источников углерода. Известно, что микроорганизмы синтезируют гидролитические ферменты, в т. ч. β -галактозидазу, лишь когда целлюлоза, гемицеллюлоза и другие сложные углеводы являются единственным источником углерода [22, 37]. При наличии более доступных для ассимиляции углеводов (простых сахаров) синтез данных ферментов прекращается. Поэтому единственным источником углерода в данной серии экспериментов служил арабиногалактан, дополнительных источников углерода в виде легкоусвояемых сахаров в питательную среду не добавляли.

В ходе исследования была показана возможность применения арабиногалактана как единственного источника углерода для культивирования гриба *R. oryzae* F-1030. Характеристика роста гриба *R. oryzae* F-1030 на питательных средах на основе арабиногалактана представлена в таблице.

Характеристика роста гриба *R. oryzae* F-1030 на питательных средах на основе арабиногалактана The characteristics of the *R. oryzae* F-1030 fungus growth on nutrient media based on arabinogalactan

Концентрация арабиногалактана, %	Сухая биомасса, г/дм ³	Избыток РВ на окончание культивирования, %	pH
2	13,9±0,7	0,16±0,02	6,9±0,2
4	14,6±0,6	0,22±0,02	7,1±0,2
6	19,7±0,9	0,39±0,02	6,9±0,3

Выявлена прямая зависимость выхода биомассы гриба от концентрации арабиногалактана: с ее увеличением пролиферация клеток гриба усиливается и его биомасса растет. Это является свидетельством расщепления арабиногалактана β -галактозидазным ферментным комплексом гриба и последующей ассимиляции выделившихся простых сахаров – арабинозы и галактозы.

Известно, что pH питательной среды является основным показателем, регулирующим физико-химические свойства и биологическую активность микроорганизма-продуцента. Необходимо на протяжении всего времени культивирования не допускать значительного отклонения значения pH от оптимального для данного микроорганизма, в случае гриба *R. oryzae* F-1030 такое значение составляет 4,5–7,0 [8, 9]. При несоблюдении приведенных оптимальных значений pH метаболическая активность гриба ощутимо замедляется. Установлено, что на начало культивирования питательная среда на основе арабиногалактана имела нейтральное значение pH $7,0 \pm 0,2$, которое в течение 7 сут. культивирования немного снижалось. Подкисление питательной среды в процессе культивирования, очевидно, связано с синтезом грибом *R. oryzae* F-1030 ряда органических кислот, в т. ч. молочной.

В предыдущей работе авторов [9] было показано, что на 7-е сут. культивирования гриб *R. oryzae* F-1030 достигает физиологической зрелости, что выражается в замедлении прироста биомассы и увеличении активности внеклеточных ферментов (ксилазазы, целлюлазы) до максимальной. Относительно β -галактозидазы гриба авторами было сделано аналогичное предположение, что по истечении 7 сут. культивирования концентрация фермента β -галактозидазы в культуральной жидкости достигнет предельно возможной для данного штамма и в дальнейшем будет поддерживаться на уровне, необходимом для утилизации субстратов в среде. Соответственно, на 7-е сутки культивирования биомассу гриба *R. oryzae* F-1030 из культуральной жидкости можно удалить, т. к. в ней уже будет находиться достаточное количество внеклеточного фермента β -галактозидазы.

На начальном этапе исследования подбирали условия, при которых внеклеточная β -галактозидаза *R. oryzae* F-1030 в наибольшей степени сможет расщепить субстрат – арабиногалактан. Известно, что для обеспечения высокой степени биоконверсии растительного сырья требуется длительное время экспозиции субстрата с ферментом в условиях, оптимальных для действия ферментного препарата [21]. Степень расщепления арабиногалактана определяли по количеству образованных РВ. Поскольку известно, что β -галактозидазы микроорганизмов обладают широким диапазоном оптимальных температур реакции: от 35 °С для клеток дрожжей до 50–65 °С для плесневых грибов [30], то первым анализируемым параметром была температура. Вторым – наличие постоянного перемешивания, т. к. для протекания биохимической реакции необходимо перемешивание, особенно при повышенных концентрациях субстрата. Интенсивность перемешивания определяет скорость и степень биоконверсии [21]. Однако при слишком интенсивном перемешивании или встряхивании вероятно механическая денатурация белков, в т. ч. и ферментов, что может выразиться в снижении скорости реакции и уменьшении выхода продукта.

Третьим анализируемым параметром стал pH, т. к. белковая природа ферментов определяет зависимость их каталитической активности от pH среды:

смещение рН в кислую или щелочную сторону от оптимальной вызывает изменение заряда функциональных групп фермента и субстрата, что приводит к изменению конформации белковой структуры фермента и, соответственно, его ферментативной активности. Наивысшая активность большинства ферментов отмечается при слабокислой или нейтральной реакции среды.

Определение оптимальных параметров действия фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030, обеспечивающих максимальное расщепление арабиногалактана, проводили при температуре 60 и 65 °С (верхняя температурная граница работы фермента), рН $7,0 \pm 0,2$, наличии постоянного перемешивания и в статичном состоянии. Было установлено, что при постоянном перемешивании увеличение содержания РВ в культуральной жидкости вследствие расщепления арабиногалактана до простых сахаров происходило как при 60, так и при 65 °С. При статичном методе инкубирования лишь при температуре 65 °С наблюдали заметный рост РВ в среде, тогда как при 60 °С и отсутствии постоянного перемешивания процесс расщепления арабиногалактана практически не шел. Концентрация субстрата в среде также влияла на эффективность ферментативного гидролиза: при повышении концентрации арабиногалактана в среде наблюдается замедление процесса выделения РВ при температуре 60 °С и отсутствии постоянного перемешивания. При изменении рН среды более чем на 0,2 ед. в обе стороны увеличения концентрации РВ практически не наблюдали, очевидно, вследствие осмотической денатурации молекулы фермента.

В результате проведенных предварительных экспериментов были определены рациональные параметры инкубирования, обеспечивающие гидролиз арабиногалактана внеклеточной β -галактозидазой *R. oryzae* F-1030 в наибольшей степени: температура 60 °С, т. к. температура 65 °С граничит с верхним температурным оптимумом фермента и может вызывать частичную тепловую денатурацию белковой молекулы; постоянное перемешивание; поддержание рН $7,0 \pm 0,2$.

На рис. 1 показано влияние температуры и концентрации субстрата на степень гидролиза арабиногалактана β -галактозидазой *R. oryzae* F-1030, выражающееся в увеличении концентрации РВ (простых сахаров) в среде. Анализ проводили при постоянном перемешивании и поддержании температуры среды 50 или 60 °С. Температура 50 °С, являющаяся нижним температурным оптимумом фермента, была введена в основную серию экспериментов в качестве контрольного параметра активности β -галактозидазы.

Как видно из рис. 1, температура 50 °С недостаточна для сохранения высокой активности фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030, т. к. при данной температуре рост концентрации РВ наблюдается лишь при высокой концентрации арабиногалактана в среде – 6 %. При более низких концентрациях статистически значимых изменений в уровне РВ в среде в течение 7 сут. инкубирования при 50 °С не наблюдали. В свою очередь, β -галактозидаза *R. oryzae* F-1030 при температуре 60 °С проявляет высокую ферментативную активность на всех концентрациях арабиногалактана, обуславливая увеличение концентрации РВ – 6-углеродных пираноз и 5-углеродных фураноз, отщепляемых ферментом от галактозного остова. При этом основной прирост РВ отмечали в первые 3 сут. инкубирования, тогда как в последующие 4 сут. увеличение концентрации РВ в среде было незначительным, что,

очевидно, связано с истощением доступных для расщепления β -галактозидозой связей в молекулах арабиногалактана, а также со взаимодействием фермента с продуктами реакции.

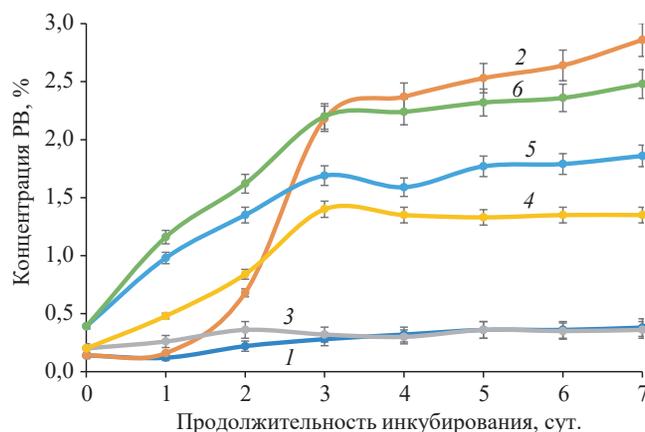


Рис. 1. Кинетика изменения уровня РВ в культуральной жидкости, содержащей β -галактозидазу *R. oryzae* F-1030 и арабиногалактан в различных концентрациях (%), при температуре процесса (°C): 1 – 2 % и 50 °C; 2 – 2 % и 60 °C; 3 – 4 % и 50 °C; 4 – 4 % и 60 °C; 5 – 6 % и 50 °C; 6 – 6 % и 60 °C

Fig. 1. The kinetics of changes in the reducing substances content in the culture liquid containing β -galactosidase *R. oryzae* F-1030 and arabinogalactan in various concentrations (%), at the process temperature (°C): 1 – 2 % and 50 °C; 2 – 2 % and 60 °C; 3 – 4 % and 50 °C; 4 – 4 % and 60 °C; 5 – 6 % and 50 °C; 6 – 6 % and 60 °C

Кроме того, было установлено, что при концентрации арабиногалактана в среде 6 % выход РВ на протяжении всего инкубирования β -галактозидазы при 60 °C был выше, чем при аналогичных условиях на среде с 4 % арабиногалактана. Данное явление вполне закономерно, т. к. с увеличением концентрации субстрата при избытке фермента должен возрастать выход конечного продукта. Однако при концентрации арабиногалактана в питательной среде 2 % при температуре инкубирования 60 °C выход РВ в последние 4 сут. инкубирования был выше, чем при концентрации арабиногалактана 6 %, хотя в первые 2 сут. прирост РВ на данной концентрации арабиногалактана был ниже, чем в аналогичных точках более высоких концентраций. Данный эффект может быть вызван явлением насыщения субстратом: при низкой концентрации субстрата скорость реакции возрастает пропорционально содержанию субстрата в среде, но по мере роста концентрации субстрата скорость увеличивается медленнее и пропорциональность нарушается вследствие насыщения активных центров фермента субстратом и взаимодействия с ферментом продуктов реакции. Таким образом, при высоких концентрациях субстрата скорость образования продукта пропорциональна не концентрации субстрата, а концентрации комплекса фермент–субстрат [20].

Изменение активности фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 в зависимости от концентрации арабиногалактана и температуры среды представлено на рис. 2. Известно, что повышение температуры приводит к увеличению кинетической энергии, что вызывает более частое столкновение молекул фермента и субстрата в единицу времени, тем самым обуславливается рост скорости реакции и происходит образование большего количества продукта [1].

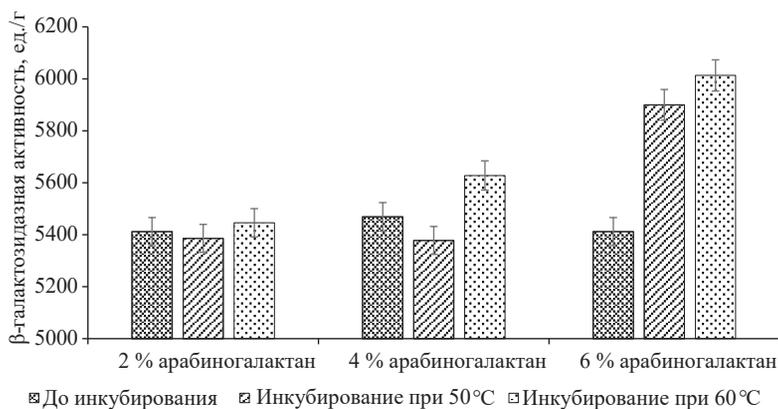


Рис. 2. Влияние температуры процесса и концентрации арабиногалактана на активность β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030

Fig. 2. The effect of the process temperature and arabinogalactan concentration on the activity of β -galactosidase *R. oryzae* F-1030

Как видно из данных рис. 2, увеличение температуры реакционной среды в совокупности с увеличением концентрации субстрата приводит к росту активности фермента β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030, выражаемой в повышении количества результативных столкновений фермент–субстрат. Например, при концентрации арабиногалактана в среде 2 % статистически значимых различий в активности фермента β -галактозидазы в зависимости от температуры среды не отмечено. При увеличении концентрации арабиногалактана до 4 % существенный рост активности фермента наблюдали лишь при температуре 60 °С, тогда как при температуре 50 °С активность фермента даже немного снижается по сравнению с начальной. Данный эффект, очевидно, связан с описанным выше явлением насыщения фермента субстратом, при котором скорость ферментативной реакции замедляется при повышении концентрации субстрата, т. к. все активные центры фермента в единицу времени связаны с субстратом или продуктом реакции. Метод определения активности фермента [15], используемый в данной работе, основан на учете количества свободных молекул фермента, способных вступить в реакцию в единицу времени. Соответственно, при концентрации арабиногалактана в среде 4 % свободных ферментных единиц при температуре 50 °С меньше, чем в изначальной культуральной жидкости, не подвергнутой нагреванию. При увеличении температуры инкубирования до 60 °С при данной концентрации арабиногалактана зафиксировали незначительное повышение активности фермента β -галактозидазы вследствие роста количества результативных столкновений фермент–субстрат и ускорения процесса освобождения активного центра фермента как итог увеличения общей кинетической энергии реакционной среды. Повышение концентрации арабиногалактана в среде до 6 % приводит к практическому нивелированию отличий в активности фермента β -галактозидазы при разных температурах инкубирования, что, вероятнее всего, связано с обилием доступного для расщепления субстрата при высокой концентрации арабиногалактана при температуре как 50, так и 60 °С. Обилие результативных столкновений при обеих анализируемых температурах привело к освобождению множества ферментативных единиц вследствие активного расщепления арабиногалактана до простых сахаров.

Заключение

Изучен потенциал использования β -галактозидазного ферментного комплекса *R. oryzae* F-1030 для биодеградации арабиногалактана. Доказана способность гриба метаболизировать и ассимилировать арабиногалактан в качестве единственного источника углерода. Подбор оптимальных условий инкубирования внеклеточной β -галактозидазы *R. oryzae* F-1030 позволил достичь эффективного уровня расщепления арабиногалактана, сопровождаемого обогащением среды простыми сахарами. Проведенное исследование открывает перспективы для последующей разработки биотехнологических процессов биодеградации арабиногалактана с получением ценных кормовых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баранова В.Н., Селиванец Е.И., Боровская Л.В. Влияние внешних факторов на ферментативные реакции // The scientific heritage. 2021. № 79. С. 37–40.

Baranova V., Selivanets E., Borovskaya L. Influence of External Factors on Enzymatic Reactions. *The Scientific Heritage*, 2021, no. 79, pp. 37–40. (In Russ.).

2. Болтовский В.С. Ферментативный гидролиз растительного сырья: состояние и перспективы // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер.: Хіміч. навук. 2021. Т. 57, № 4. С. 502–512.

Boltovsky V.S. Enzymatic Hydrolysis of Plant Raw Materials: State and Prospects. *Vesći Nacyânal'naj akademii navuk Belarusi. Seryâ himičnyh navuk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 502–512. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-502-512>

3. Бушнева О.А., Оводова Р.Г., Шапков А.С., Чижов А.О., Гюнтер Е.А., Оводов Ю.С. Структурное исследование арабиногалактана и пектина из каллуса *Silene vulgaris* (М.) G. // Биохимия. 2006. Т. 71, № 6. С. 798–807.

Bushneva O.A., Ovodova R.G., Shashkov A.S., Chizhov A.O., Gunter E.A., Ovodov Yu.S. Structural Studies of Arabinogalactan and Pectin from *Silene vulgaris* (M.) G. callus. *Biokhimiya* = Biochemistry (Moscow), 2006, vol. 71, no. 6, pp. 644–651.

<https://doi.org/10.1134/S0006297906060083>

4. Галютудинова И.А., Канарский А.В., Канарская З.А., Кузнецов А.Г. Эффективность культивирования дрожжей *Debaryomyces hansenii* и *Guehomyces pullulans* на питательных средах из арабиногалактана // Вестн. технол. ун-та. 2016. Т. 19, № 16. С. 96–99.

Galyautdinova I.A., Kanarskiy A.V., Kanarskaya Z.A., Kuznetsov A.G. Efficiency of *Debaryomyces hansenii* and *Guehomyces pullulans* Yeasts Cultivation in Nutrient Media of Arabinogalactan. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2016, vol. 19, no. 16, pp. 96–99. (In Russ.).

5. Гусева Е.Ю., Романцева Ю.Н. Апробирование арабиногалактана в процессе переработки продукции мараловодства // Вестн. КрасГАУ. 2019. № 7. С. 143–146.

Guseva E.Yu., Romantseva Yu.N. The Testing of Arabinogalactan in the Course of Deer Farming Products Processing. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2019, no. 7, pp. 143–146. (In Russ.).

6. Кузнецов А.Г., Махотина Л.Г., Аким Э.Л. Использование биополимера арабиногалактана при производстве целлюлозных композиционных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2012. № 5(25). С. 82–84.

Kuznetsov A.G., Makhotina L.G., Akim E.L. Usage of Biopolimer Arabinogalactan in Production of Cellulose Composites. *Dizajn. Materialy. Tekhnologiya* = Design. Materials. Technology, 2012, no. 5(25), pp. 82–84. (In Russ.).

7. Кулешова М.А., Рудакова В.А. Ферментативный гидролиз отходов переработки дикорастущего плодово-ягодного сырья северных районов европейской части России // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: тез. докл. XI Всерос. науч.-практ. конф. Бийск: АлтГТУ, 2018. С. 366–368.

Kuleshova M.A., Rudakova V.A. Enzymatic Hydrolysis of Waste from Wild-Growing Fruit and Berry Raw Materials Processing from Northern Regions of the European Part of Russia. *Tekhnologii i oborudovanie khimicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoj promyshlennosti*: Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference. Biysk, Altai State Technical University Publ., 2018, pp. 366–368. (In Russ.).

8. Мингазова Л.А., Канарский А.В., Крякунова Е.В., Канарская З.А. Синтез молочной кислоты грибом *Rhizopus oryzae* F-1030 на питательных средах из сульфитных щелоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 146–158.

Mingazova L.A., Kanarsky A.V., Kryakunova E.V., Kanarskaya Z.A. Lactic Acid Synthesis by Fungus *Rhizopus oryzae* F-1030 on Growth Media Based on Sulphite Liquors. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 2, pp. 146–158. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-146-158>

9. Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Галиева А.Р., Канарская З.А., Канарский А.В., Кручина-Богданов И.В., Белкина Е.В. Влияние способа культивирования гриба *Rhizopus oryzae* F-1030 на гидролизатах нейтрально-сульфитного щелока на эффективность синтеза молочной кислоты // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2024. № 250. С. 405–422.

Mingazova L.A., Kryakunova E.V., Galieva A.R., Kanarskaya Z.A., Kanarskii A.V., Kruchina-Bogdanov I.V., Belkina E.V. The Fungus *Rhizopus oryzae* F-1030 Cultivating Mode on Neutral Sulfite Liquor Hydrolysates Affects the Lactic Acid Synthesis Efficiency. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 2024, no. 250, pp. 405–422. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.250.405-422>

10. Митина Г.В., Сокорнова С.В., Махотина Л.Г., Кузнецов А.Г., Аким Э.Л. Перспективы использования арабиногалактана для культивирования высших грибов и микроорганизмов – продуцентов средств защиты растений // Вестн. защиты растений. 2012. № 3. С. 28–32.

Mitina G.V., Sokornova S.V., Mahotina L.G., Kuznetsov A.G., Akim E.L. The Perspectives of Arabinogalactan for Cultivation Microbiological Control Agents and Mushrooms. *Vestnik Zashchity Rasteniy* = Plant Protection News, 2012, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

11. Митина Г.В., Сокорнова С.В., Титова Ю.А., Махотина Л.Г., Кузнецов А.Г., Первушин А.Л. Использование макро- и микромицетов в биоконверсии растительного сырья // Изв. РГПУ им. А.И. Герцена. 2013. № 163. С. 69–79.

Mitina G., Sokornova S., Titova Ju., Mahotina L., Kuznetsov A., Pervushin A. The Usage of Macro- and Micromycetes in the Bioconversion of Wood Raw Material. *Izvestiya RGPU im. A.I. Gertsena* = Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences, 2013, no. 163, pp. 69–79. (In Russ.).

12. Морозова Ю.А., Скворцов Е.В., Алимова Ф.К., Канарский А.В. Биосинтез ксиланаз и целлюлаз грибами рода *Trichoderma* на послеспиртовой барде // Вестн. технол. ун-та. 2012. Т. 15, № 19. С. 120–122.

Morozova Yu.A., Skvorcov E.V., Alimova F.K., Kanarskiy A.V. Biosynthesis of Xylanases and Cellulases by Fungi of the Genus *Trichoderma* on Post-Alcohol Stillage. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2012, vol. 15, no. 19, pp. 120–122. (In Russ.).

13. Никанова Л.А. Использование дигидрокверцетина и арабиногалактана в питании порослят-отъемышей // Вестн. АПК Верхневолжья. 2019. № 3(47). С. 47–50.

Nikanova L.A. The Use of Dihydroquercetin and Arabinogalactan in the Diet of Weaned Piglets. *Vestnik APK Verhevolzh'ya* = Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald, 2019, no. 3(47), pp. 47–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.35694/YARCX.2019.47.3.010>

14. Першакова Т.В., Хагур Р.Н. Исследование влияния арабиногалактана на качество кондитерских изделий // Науч. журн. КубГАУ. 2012. № 84(10). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/72.pdf> (дата обращения: 21.04.25).

Pershakova T.V., Khagur R.N. Investigation of the Influence of Arabinogalactan on the Quality of Confectionery Products. *Nauchnyj zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU, 2012, no. 84(10), art. no. 0841210072. (In Russ.).

15. Полыгалина Г.В., Чередниченко В.С., Римарева Л.В. Определение активности ферментов. Справочник. М.: ДеЛи принт, 2003. 375 с.

Polygalina G.V., Cherednichenko V.S., Rimareva L.V. *Determination of Enzyme Activity. Handbook*. Moscow, DeLi print Publ., 2003. 375 p. (In Russ.).

16. Разработка ветеринарного препарата на основе биологически активных соединений биомассы лиственницы: отчет о НИР / ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ; рук-ль Ч.Б. Кушеев. Иркутск, 2018. ГК №Ф.2018.206347. 99 с.

Development of a Veterinary Drug Based on Biologically Active Compounds of Larch Biomass: Research Report. Irkutsk State Agrarian University; Research Director Ch.B. Kushcheev. Irkutsk, 2018, State Corporation no. F.2018.206347. 99 p. (In Russ.).

17. Скрипнюк А.А., Рябцева С.А. Современные методы получения β-галактозидаз // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 3. С. 197–204.

Skripunyuk A.A., Riabtseva S.A. Modern Methods for Producing β-galactosidase. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii* = Science. Innovations. Technologies, 2014, no. 3, pp. 197–204. (In Russ.).

18. Торшков А.А. Влияние арабиногалактана на продуктивные качества цыплят-бройлеров // Изв. ОГАУ. 2010. № 27-1. С. 203–205.

Torshkov A.A. Evaluation of Arabinogalactan on the Productive Qualities of Broiler Chickens. *Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University, 2010, no. 27-1, pp. 203–205. (In Russ.).

19. Фомичев Ю.П., Никанова Л.А., Дорожкин В.И., Торшков А.А., Романенко А.А., Еськов Е.К., Семенова А.А., Гогоцкий В.А., Дунаев А.В., Ярошевич Г.С., Лашин С.А., Стольная Н.И. Дигидрокверцетин и арабиногалактан – природные биорегуляторы в жизнедеятельности человека и животных, применение в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. М.: Науч. библиотека, 2017. 702 с.

Fomichev Yu.P., Nikanova L.A., Dorozhkin V.I., Torshkov A.A., Romanenko A.A., Es'kov E.K., Semenova A.A., Gonotskij V.A., Dunaev A.V., Yaroshevich G.S., Lashin S.A., Stol'naya N.I. *Dihydroquercetin and Arabinogalactan – Natural Bioregulators in Human and Animal Life, Application in Agriculture and Food Industry*. Moscow, Nauchnaya biblioteka Publ., 2017. 702 p. (In Russ.).

20. Черникевич И.П. Ферментативный катализ // Журн. ГрГМУ. 2008. № 1. С. 21–27.

Chernikevich I.P. Enzymatic Catalysis. *Zhurnal Grodnenskogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta* = Journal of the Grodno State Medical University, 2008, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.).

21. Шариков А.Ю., Иванов В.В., Амелякина М.В. Влияние перемешивания на эффективность ферментативного гидролиза высококонцентрированных сред экструдированного крахмала кукурузы // Вестн. ВГУИТ. 2020. Т. 82, № 3. С. 96–103.

Sharikov A.Yu., Ivanov V.V., Amelyakina M.V. Effect of Agitation on the Efficiency of Enzymatic Hydrolysis of Highly Concentrated Media of Extruded Corn Starch. *Vestnik VGUIT* = Proceedings of VSUET, 2020, vol. 82, no. 3, pp. 96–103. (In Russ.).

<https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-3-96-103>

22. *Advances in Biorefineries. Biomass and Waste Supply Chain Exploitation*. Ed. by K. Waldron. Cambridge, Sawston: Woodhead Publ., 2014. 902 p.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-521-3.50033-8>

23. *Arabinogalactan Market Analysis by Animal Feed, Pharmaceuticals, Cosmetic and Others through 2035*. New York, Future Market Insights Publ., 2025. 250 p.

24. Cheng J., Wei C., Li W., Wang Y., Wang S., Huang Q., Liu Y., He L. Structural Characteristics and Enhanced Biological Activities of Partially Degraded Arabinogalactan from Larch Sawdust. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, vol. 171, pp. 550–559. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.039>

25. Ghosh K., Takahashi D., Kotake T. Plant Type II Arabinogalactan: Structural Features and Modification to Increase Functionality. *Carbohydrate Research*, 2023, vol. 529, art. no. 108828. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2023.108828>

26. Ito K., Fukuoka K., Nishigaki N., Hara K., Yoshimi Y., Kuki H., Takahashi D., Tsumuraya Y., Kotake T. Structural Features Conserved in Subclass of Type II Arabinogalactan. *Plant Biotechnology*, 2020, vol. 37, iss. 4, pp. 459–463. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.20.0721a>

27. Kalenborn S., Zühlke D., Harder J. Proteomic Insight into Arabinogalactan Utilization by Particle-Associated *Maribacter* sp. MAR_2009_72. *FEMS Microbiology Ecology*, 2024, vol. 100, iss. 5, art. no. fiae045. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae045>

28. Leszczuk A., Kalaitzis P., Zdunek A. Review: Structure and Modifications of Arabinoxylan Proteins (AGPs). *BMC Plant Biology*, 2023, vol. 23, art. no. 45. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04066-5>

29. Li N., Yang F., Su J., Shi S., Ordaz-Ortiz J.J., Cheng X., Xiong S., Xu Y., Wu J., Wang H., Wang S. Structure Characterization of an Arabinogalactan from *Cynanchum atratum* and its Immune Stimulatory Activity on RAW264.7 Cells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, vol. 194, pp. 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.172>

30. Liu Z., Zhao C., Deng Y., Huang Y., Liu B. Characterization of a Thermostable Recombinant β -Galactosidase from a Thermophilic Anaerobic Bacterial Consortium YTY-70. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2015, vol. 29, iss. 3, pp. 547–554. <https://dx.doi.org/10.1080/13102818.2015.1015244>

31. Malyar Yu.N., Borovkova V.S., Kazachenko A.S., Fetisova O.Yu., Skripnikov A.M., Sychev V.V., Taran O.P. Preparation and Characterization of Di- and Tricarboxylic Acids-Modified Arabinogalactan Plasticized Composite Films. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 9, art. no. 1999. <https://doi.org/10.3390/polym15091999>

32. Pokatilov F.A., Akamova H.V., Kizhnyaev V.N. Synthesis and Properties of Tetrazole-Containing Polyelectrolytes Based on Chitosan, Starch, and Arabinogalactan. *E-Polymers*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 203–213. <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-0026>

33. Qi H., Tang S., Bian B., Lai C., Chen Y., Ling Z., Yong Q. Effect of H_2O_2 - V_C Degradation on Structural Characteristics and Immunomodulatory Activity of Larch Arabinogalactan. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024, vol. 12, art. no. 1461343. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1461343>

34. Ruiz-Ramírez S., Jiménez-Flores R. *Invited Review*: Properties of β -Galactosidases Derived from *Lactobacillaceae* Species and Their Capacity for Galacto-Oligosaccharide Production. *Journal of Dairy Science*, 2023, vol. 106, iss. 12, pp. 8193–8206. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23392>

35. Saito K., Hasa Y., Abe H. Production of Lactic Acid from Xylose and Wheat Straw by *Rhizopus oryzae*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2012, vol. 114, pp. 166–169. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2012.03.007>

36. Sasaki Y., Yanagita M., Hashiguchi M., Horigome A., Xiao J.-Z., Odamaki T., Kitahara K., Fujita K. Assimilation of Arabinogalactan Side Chains with Novel 3-O- β -L-Arabinopyranosyl- α -L-Arabinofuranosidase in *Bifidobacterium pseudocatenulatum*. *Microbiome Research Reports*, 2023, vol. 2, art. no. 12. <https://doi.org/10.20517/mrr.2023.08>

37. Srivastava N., Rathour R., Jha S., Pandey K., Srivastava M., Thakur V.K., Sengar R.S., Gupta V.K., Mazumder P.B., Khan A.F., Mishra P.K. Microbial Beta Glucosidase Enzymes: Recent Advances in Biomass Conversion for Biofuels Application. *Biomolecules*, 2019, vol. 9, no. 6, art. no. 220. <https://doi.org/10.3390/biom9060220>

38. Tang S., Jiang M., Huang C., Lai C., Fan Y., Yong Q. Characterization of Arabinoxylans from *Larix principis-rupprechtii* and Their Effects on NO Production by Macrophages. *Carbohydrate Polymers*, 2018, vol. 200, pp. 408–415.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.027>

39. Volford B., Varga M., Szekeres A., Kotogán A., Nagy G., Vágvölgyi C., Papp T., Takó M. β -Galactosidase-Producing Isolates in Mucoromycota: Screening, Enzyme Production, and Applications for Functional Oligosaccharide Synthesis. *Journal of Fungi*, 2021, vol. 7, no. 3, art. no. 229. <https://doi.org/10.3390/jof7030229>

40. Zvereva M.V., Zhmurova A.V. Synthesis, Structure, and Spectral Properties of ZnTe-Containing Nanocomposites Based on Arabinogalactan. *Russian Journal of General Chemistry*, 2022, vol. 92, pp. 1995–2004. <https://doi.org/10.1134/S1070363222100139>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 661.183.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-169-179

Активные угли из водорослевого остатка альгинатного производства, содержащего измельченную древесину

Д.С. Плахина¹, *вед. технолог*; *ResearcherID*: [KIG-7569-2024](https://orcid.org/0009-0003-0737-2907),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0737-2907>

Н.И. Богданович², *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID*: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

¹Архангельский водорослевый комбинат, просп. Ленинградский, д. 328, г. Архангельск, Россия, 163030; plahina.d.s@ab1918.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002

Поступила в редакцию 07.12.24 / Одобрена после рецензирования 10.03.25 / Принята к печати 15.03.25

Аннотация. Активные угли, получаемые из различных углеродсодержащих материалов, являются высокопористыми углеродными адсорбентами с развитой внутренней поверхностью. Особое внимание следует уделить многотоннажным отходам лесохимической промышленности и сельского хозяйства, переработки древесины. К таким отходам относятся древесный уголь, лигнин, опилки и щепа, куски коры, солома и шелуха от переработки готовой продукции, скорлупа орехов, косточки фруктов, листья плодовых деревьев. Пористое вещество, получаемое из древесного сырья, обладает высокой адсорбционной способностью, а также большой площадью удельной поверхности. В ходе глубокой переработки бурых водорослей на Архангельском водорослевом комбинате образуется большое количество органических отходов. Целью работы стало получение активных углей из альгинатного отхода, состоящего на 70 % из древесной муки. Для этого был использован метод термохимической активации с гидроксидом натрия в качестве активирующего агента. Исходное сырье имело влажность 76 % и разнородный состав по минеральным и органическим веществам. Исследование проводили как планированный эксперимент. В качестве плана выбран центральный композиционный ротатабельный план 2-го порядка для 3 факторов. Независимыми переменными выступали дозировка гидроксида натрия, температура пиролиза и его продолжительность. По итогам исследования определены оптимальные значения этих факторов для получения активных углей из водорослевого отхода, а также оптимальные параметры, влияющие на сорбционную способность и пористую структуру активных углей. Работа имеет практическое значение, т. к. активированный уголь в порошкообразной и гранулированной формах широко используется в различных областях промышленности, включая фармацевтическую, пищевую, ликеро-водочную, очистку газовых сред, водоподготовку, очистку сточных вод, биомедицину, а также может применяться в сельском хозяйстве в качестве агросорбентов и компонентов для улучшения почвы. По результатам исследования можно заключить, что использование в качестве сырьевого материала органического отхода для синтеза активного угля методом термохимической активации с гидроксидом натрия представляет большой интерес.

Ключевые слова: альгинатное производство, вторичный ресурс альгинатного производства, древесная мука, активные угли, пиролиз, осветляющая способность, сорбция по гексану и водяному пару, планированный эксперимент

© Плахина Д.С., Богданович Н.И., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Для цитирования: Плахина Д.С., Богданович Н.И. Активные угли из водорослевого остатка альгинатного производства, содержащего измельченную древесину // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 169–179. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-169-179>

Original article

Active Carbons from Algae Residue of Alginate Production Containing Groundwood

*Darya S. Plakhina*¹, *Leading Technologist; ResearcherID: [KIG-7569-2024](https://orcid.org/0009-0003-0737-2907),*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0737-2907>

*Nikolay I. Bogdanovich*², *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

¹Arkhangelsk Seaweed Factory, prosp. Leningradskiy, 328, Arkhangelsk, 163030, Russian Federation; plakhina.d.s@ab1918.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Received on December 7, 2024 / Approved after reviewing on March 10, 2025 / Accepted on March 15, 2025

Abstract. Active carbons obtained from various carbon-containing materials are highly porous carbon adsorbents with a developed internal surface. Particular attention should be paid to large-tonnage waste from the wood-chemical industry and agriculture, as well as wood processing. Such waste includes charcoal, lignin, sawdust and chips, pieces of bark, straw and husks from the processing of finished products, nut shells, fruit pits, and leaves of fruit trees. The porous substance obtained from wood raw materials has a high adsorption capacity, as well as a large specific surface area. In the course of the deep processing of brown algae at the Arkhangelsk Seaweed Factory, a large amount of organic waste is generated. The aim of the work has been to obtain active carbons from alginate waste consisting of 70 % wood flour. For this purpose, the method of thermochemical activation with sodium hydroxide as an activating agent has been used. The initial raw material has had a moisture content of 76 % and a diverse composition of mineral and organic substances. The research has been carried out as a planned experiment. The design chosen has been a 2nd-order central composite rotatable one for 3 factors. The independent variables have been the sodium hydroxide dosage, pyrolysis temperature and its duration. Based on the results of the study, the optimal values of these factors for obtaining active carbons from algal waste have been determined, as well as the optimal parameters affecting the sorption capacity and porous structure of active carbons. The work is of practical importance, since active carbon in powder and granular forms is actively used in various industries, including pharmaceutical, food, distillery, gas purification, wastewater treatment, biomedicine, and can also be used in agriculture as agricultural sorbents and soil improvement components. Based on the results of the research, it can be concluded that the use of organic waste as a raw material for the synthesis of active carbon by thermochemical activation with sodium hydroxide is of great interest.

Keywords: alginate production, alginate production secondary resource, wood flour, active carbons, pyrolysis, clarification capacity, hexane and water vapor sorption, planned experiment

For citation: Plakhina D.S., Bogdanovich N.I. Active Carbons from Algae Residue of Alginate Production Containing Groundwood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 169–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-169-179>

Введение

Активные угли – это высокопористые твердые вещества, полученные на основе углеродсодержащего сырья, обладающие развитой внутренней поверхностью (от сотен до двух тысяч квадратных метров на грамм) [1] и имеющие высокие поглотительные характеристики по примесям, находящимся в очищаемых средах (воздух, газы, вода, жидкости, почва). В их пористой структуре происходит поглощение различных органических микропримесей благодаря силам адсорбции (силам поверхностного взаимодействия) [7, 10].

При производстве различных марок активного угля одним из главных определяющих факторов является исходное сырье и его свойства, поэтому рационально управлять процессом активирования углей можно только в случае глубокого знания свойств исходного сырья [1, 12, 13].

Углеродные сорбенты получают из органических веществ биологического, растительного происхождения. В качестве сырья используют древесину различных пород, торф и торфяной полукокс с небольшим содержанием золы, ископаемые угли разной стадии метаморфизма (бурые, каменные угли, антрациты), полукокс и коксы на их основе и другие материалы, содержащие углерод [1, 3, 6, 11, 14].

Особое внимание следует уделить растительному сырью, т. к. получаемый из него уголь сохраняет исходную мелкопористую структуру и служит прекрасным источником для изготовления углеродных адсорбентов [7, 13]. Любая растительная биомасса, в основе химического строения которой лежат биополимеры – целлюлоза и лигнин, может быть подвергнута термической обработке, в результате которой образуются твердый углеродный остаток (уголь), жидкие вещества (пирогенные смолы) и газообразные продукты пиролиза [15]. Органический отход, полученный при комплексной переработке водорослей, также может быть использован как исходное сырье. Он представляет собой мелкоизмельченную массу в виде смеси древесной муки и остатков выработанных морских водорослей.

Активированный уголь в порошкообразной и гранулированной формах является хорошо известным универсальным адсорбентом, имеющим широкий спектр применения, включая очистку, рекультивацию загрязненной водной среды, очистку жидких и газообразных отходов, образующихся в промышленности, хранение и транспортировку газа, извлечение металлов из растворов, катализ растений и химических реакций, биомедицинские сферы [7, 8, 12, 13, 16–23].

Целью работы являлось получение активных углей методом термохимической активации с использованием гидроксида натрия в качестве активирующего агента [2, 4].

Задачи: в лабораторных условиях получить образцы активных углей из органических отходов от производства альгината натрия; оценить адсорбционные свойства этих углей.

Объекты и методы исследования

Сырьем для изготовления углеродных адсорбентов в данной работе являлся органический отход от производства альгината натрия путем комплекс-

ной переработки беломорских водорослей на ООО «Архангельский водорослевый комбинат». Отход образуется в результате фильтрации и отделения от жидкой фазы остатков щелочной экстракции бурых водорослей. Фильтрацию осуществляли через насыпной слой древесной муки, позволяющей более глубоко отделить механические примеси.

В лабораторных условиях определили исходную влажность сырья высушиванием в сушильном шкафу при температуре 105 °С до воздушно-сухого состояния. Влажность органического отхода составила 76 %, рН – 8,7. Отход имел разнообразный состав (% в пересчете на сухое вещество) как по минеральным, так и по органическим веществам [9]: органическое вещество – 92,13; в т. ч. клетчатка – 44,93; зола – 5,5; общий азот – 0,67; общий фосфор – 0,21; общий калий – 0,43; кальций – 1,06.

Исследование проводили с помощью планированного эксперимента. Так как выходные параметры в условиях опытов должны изменяться по простым функциональным зависимостям не выше 2-го порядка, в качестве плана был выбран центральный композиционный ротатабельный план 2-го порядка для 3 факторов (табл. 1) [5].

Таблица 1

Значения и интервалы варьирования факторов эксперимента [1]
The values and variability intervals of experimental factors [1]

Фактор	Интервал варьирования	Уровни варьирования факторов, x_i				
		-1,682 (- α)	-1	0	1	1,682 (+ α)
Температура процесса, °С (x_1)	30	650	670	700	730	750
Продолжительность пиролиза (τ), мин (x_2)	25	23	40	65	90	107
Дозировка NaOH, г/г (x_3)	20	116	130	150	170	184

Подготовленные образцы подвергали пиролизу в режиме термохимической активации на установке в лаборатории кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств. В качестве активирующего агента применяли гидроксид натрия. Заранее зная влажность исходного сырья и концентрацию раствора щелочи (гидроксида натрия), их смешивали в определенных отношениях. Полученную вязкую массу заливали в металлическую реторту и помещали в разогретую до определенной температуры печь для пиролиза. Сушка реакционной смеси происходила в реторте перед началом термохимического разложения. Продолжительность пиролиза составляла от 23–107 мин. [1].

Выгрузку угольного остатка осуществляли в водной фазе. Достигалось это путем заливания остывшей реторты примерно 400 мл дистиллированной воды и количественного переноса угля в стаканы для его дальнейшей обработки (выщелачивание, сушка, измельчение) и анализа [1].

Выходными характеристиками были выбраны: выход активных углей на а.с.с., осветляющая способность по метиленовому голубому ($A_{м.г}$), сорбция по гексану (A_g) и водяному пару (A_v) (табл. 2).

Выход активного угля рассчитывали на сухую массу исходного сырья по следующей формуле:

$$B = \frac{M_{AV}}{M_C \cdot \left(1 - \frac{W_C}{100}\right)} \cdot 100,$$

где M_{AV} – выход активного угля, г; M_C , W_C – масса, г, и влажность, %, исходного сырья соответственно.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента
The planning matrix and the results of the experiment

Код	x_1	x_2	x_3	Выход АУ, на а.с.с., %	Сорбционная активность, мг/г		
					$A_{м.г}$	$A_{г}$	$A_{в}$
АУ-1	670	40	130	15,16	974	949	995
АУ-2	730	40	130	12,29	1088	1078	1228
АУ-3	670	90	130	12,94	1051	1084	1199
АУ-4	730	90	130	12,66	1064	1249	1187
АУ-5	670	40	170	11,43	1028	1026	1087
АУ-6	730	40	170	11,10	1055	1121	1257
АУ-7	670	90	170	10,92	1048	1143	1268
АУ-8	730	90	170	8,14	1168	1505	893
АУ-9	650	65	150	13,95	1027	984	1092
АУ-10	750	65	150	9,59	1132	1411	906
АУ-11	700	23	150	15,79	967	849	895
АУ-12	700	107	150	10,95	1075	1110	1254
АУ-13	700	65	116	13,13	1085	1043	1187
АУ-14	700	65	184	8,84	1120	1238	1205
АУ-15	700	65	150	11,12	1116	1190	1205
АУ-16	700	65	150	11,07	1127	1185	1229
АУ-17	700	65	150	11,10	1106	1096	1167
АУ-18	700	65	150	11,38	1116	1041	1250
АУ-19	700	65	150	11,51	1120	1116	1239
АУ-20	700	65	150	11,49	1104	1173	1230

Примечание: АУ – активный уголь.

Осветляющая способность по метиленовому голубому характеризует способность активных углей сорбировать из водных растворов крупные молекулы органических веществ. Принято считать, что подобные молекулы сорбируются на поверхности пор (мезопор), а значит, по результатам анализа мы получаем информацию об их содержании в исследуемых углях [2, 4].

Для установления осветляющей способности по метиленовому голубому использовали стандартную методику (ГОСТ 4453–74. Уголь активированный осветляющий древесный порошкообразный). Ввиду высоких осветляющих свойств полученных углей объем добавляемого раствора метиленового голубого составил 50 мл. Методика основана на фотоколориметрическом определении светопропускания раствора метиленового голубого до и после обработки углем [1]. Оптическую плотность приготовленных растворов измеряли на сканирующем спектрофотометре UNICO (UNICO, США).

Навеску активного угля массой $0,05 \pm 0,0003$ г помещали в коническую колбу вместимостью 100 мл, прибавляли 50 мл раствора метиленового голубого, колбу закрывали пробкой и взбалтывали на аппарате 30 мин. После окончания взбалтывания уголь отфильтровывали через бумажный фильтр и определяли в отфильтрованном растворе концентрацию метиленового голубого.

Осветляющую способность угля по метиленовому голубому находили по формуле:

$$A = \frac{(c_1 - c_2k) \cdot 0,050}{m},$$

где c_1 – концентрация исходного раствора красителя, мг/л; c_2 – концентрация раствора после обработки углем, мг/л; k – коэффициент разбавления раствора, взятого для анализа после контактирования с углем; m – масса навески угля, г; 0,050 – объем раствора метиленового голубого, взятого для анализа, л [1].

Сорбцию паров гексана и водяных паров определяли эксикаторным методом. Во взвешенный и высушенный бюкс помещали навеску угля около 0,4 г, взвешенную с точностью 0,0003 г. Бюкс с открытой крышкой ставили в эксикатор, заполненный на $\frac{1}{4}$ объема гексаном или водой. Взвешивание бюксов проводили через 24 ч от начала эксперимента, т. к. именно через 24 ч наступает состояние равновесия. Равновесную величину сорбции паров гексана (водяных паров) рассчитывали как отношение привеса к его исходной навеске:

$$\Gamma = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \cdot 1000,$$

где m_1 , m_2 – масса бюкса с навеской угля после и до взаимодействия с адсорбатом соответственно, г; m_3 – масса навески, г [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Выходные параметры, представленные в табл. 2, были использованы для расчета коэффициентов уравнений регрессии. Уравнения со значимыми коэффициентами проверяли на адекватность экспериментальными данными по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и использовали для построения поверхностей отклика, которые наглядно иллюстрируют изменение параметров в зависимости от условий получения активного угля [5]. При заданном уровне значимости все полученные уравнения оказались адекватными экспериментальным данным.

Влияние условий активации на выход активного угля [1].

$$y_1 = 11,27 - 0,99x_1 - 0,99x_2 - 1,37x_3 + 0,69x_2^2.$$

Из уравнения видно, что на выход активного угля влияют все 3 фактора (температура, продолжительность активации и дозировка гидроксида натрия). Поверхности отклика (рис. 1) показывают, что наиболее низкий выход наблюдается у образцов с максимальными температурой термохимической активации, продолжительностью процесса и дозировкой активирующего агента. Это указывает на необходимость поддержания этих параметров на нижнем уровне при промышленной реализации процесса, что будет экономически выгодным с точки зрения энергозатрат.

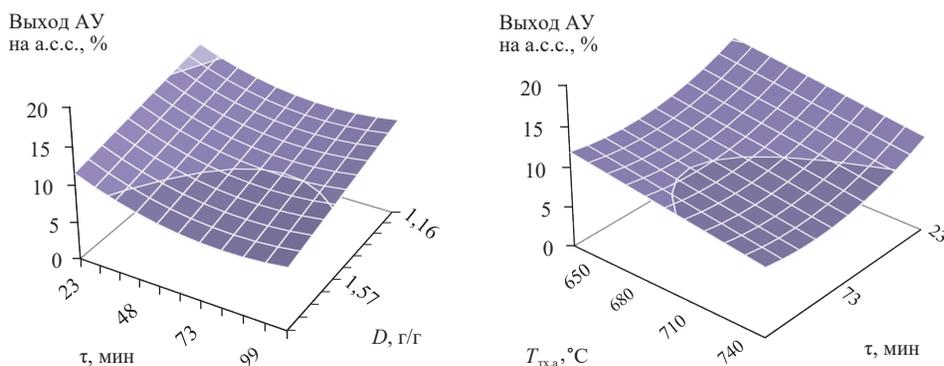


Рис. 1. Влияние режимных параметров на выход активных углей ($T_{\text{тх.а}}$ – термохимическая активация; D – дозировка NaOH)

Fig. 1. The influence of operating parameters on the yield of active carbons ($T_{\text{тх.а}}$ – thermochemical activation; D – NaOH dosage)

Влияние условий активации на адсорбционные свойства по метиленовому голубому [1].

$$y_2 = 1113,43 + 33,09x_1 + 26,68x_2 + 13,16x_3 + 9,85x_2x_3 - 13,17x_1^2 - 33,87x_2^2.$$

На рис. 2 можно увидеть, что адсорбционная активность по метиленовому голубому показывает линейную зависимость от температуры термохимической активации и дозировки щелочи. При повышении этих значений количество адсорбированных веществ будет линейно расти, значит, температура и дозировка оказывают положительное влияние. Также на сорбционные свойства по метиленовому голубому воздействует продолжительность активации. При максимальной и минимальной продолжительности процесса адсорбционные свойства по метиленовому голубому будут наименьшими. Максимальные значения наблюдаются при продолжительности активации 70 мин.

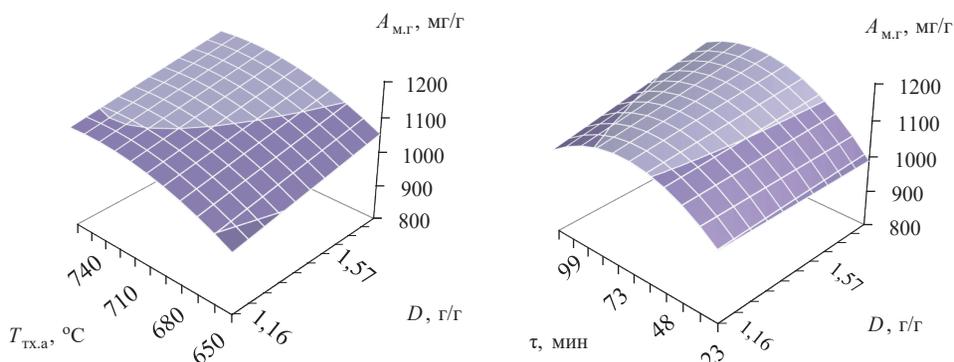


Рис. 2. Влияние режимных параметров на адсорбционные свойства по МГ

Fig. 2. The influence of operating parameters on methylene blue adsorption properties

Влияние условий активации на адсорбционные свойства по гексану [1].

$$y_3 = 1130,60 + 107,55x_1 + 91,20x_2 + 55,98x_3 + 37,87x_1x_2 + 24,28x_2x_3 + 31,50x_1^2 - 45,53x_2^2.$$

Как видно из уравнения регрессии и графических зависимостей (рис. 3), адсорбционная активность по гексану положительно связана со всеми режимными

ми параметрами процесса. Значение адсорбции по парам гексана находится в линейной зависимости от температуры и дозировки гидроксида натрия. Аналогичное наблюдаем при максимальных температуре и продолжительности процесса. Следовательно, при наибольших значениях переменных факторов эксперимента адсорбционная активность по парам гексана будет максимальной.

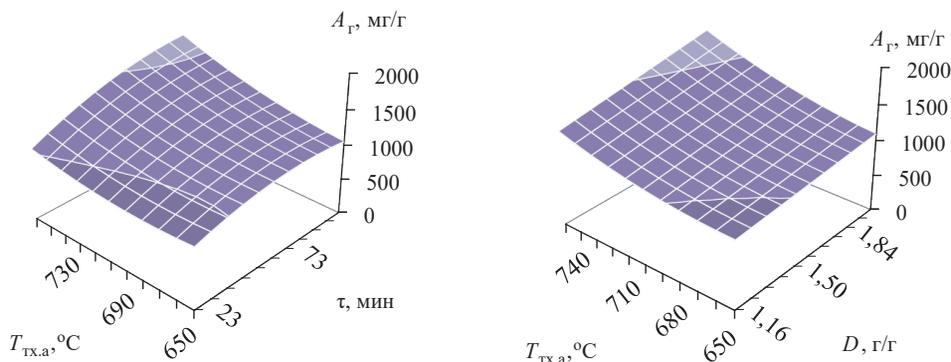


Рис. 3. Влияние режимных параметров на адсорбцию по гексану

Fig. 3. The influence of operating parameters on hexane adsorption

Влияние условий активации на сорбцию по водяному пару [1].

$$y_4 = 1216,82 + 42,73x_2 - 98,93x_1x_2 - 53,26x_1x_3 - 43,19x_2x_3 - 65,67x_1^2 + 39,06x_2^2.$$

Анализ поверхностей отклика (рис. 4) и уравнения регрессии показывает, что температура термохимической активации и продолжительность процесса в данном интервале варьирования характеризуются двойным взаимодействием. При повышении температуры максимальная сорбция по водяному пару будет наблюдаться при минимальной продолжительности процесса и, наоборот, при увеличении длительности процесса наибольшая сорбция по водяному пару соответствует минимальной температуре термохимической активации. На графике справа также видно двойное взаимодействие параметров. При невысокой дозировке активирующего агента повышение температуры термохимической активации положительно влияет на сорбцию по водяному пару, а при росте дозировки – отрицательно.

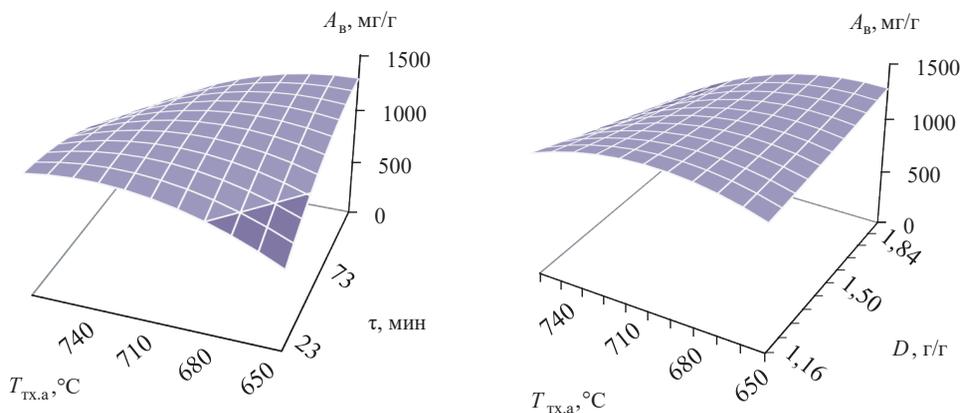


Рис. 4. Влияние режимных параметров на сорбцию по водяному пару

Fig. 4. The influence of operating parameters on water vapor sorption

Заключение

Выявлено, что продолжительность и температура активации положительно влияют на сорбционные характеристики полученных адсорбентов. Значительное увеличение температуры термохимической активации ведет к росту сорбционных свойств активных углей, поэтому важно поддерживать этот показатель на уровне 750 °С. Однако выявлена неоднозначная взаимосвязь влияния температуры термохимической активации и продолжительности процесса на формирование сорбционных свойств по водяному пару. Так, при низкой температуре с повышением продолжительности процесса сорбция резко возрастает до 1268 мг/г и, наоборот, при высокой температуре с уменьшением продолжительности активации сорбционная способность резко снижается. Полученные синтезированные адсорбенты обладают высокими адсорбционными свойствами, что позволяет рекомендовать их для использования в различных областях. Следует отметить, что осветляющая способность по метиленовому голубому в 4–5 раз превышает стандартные требования, предъявляемые к выпускаемым адсорбентам подобного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анциферова (Плахина) Д.С. Термокаталитический пиролиз отходов переработки сельскохозяйственных культур: выпускная квалификац. работа. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2018. 111 с. Режим доступа: https://library.narfu.ru/components/com_irbis/pdf_view/?316956 (дата обращения: 15.06.24).

Antsiferova (Plakhina) D.S. *Thermocatalytic Pyrolysis of Crop Processing Waste: Final Qualifying Work*. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2018. 111 p. (In Russ.).

2. Анциферова (Плахина) Д.С., Смирнова А.И. Пиролиз отходов сельскохозяйственных культур // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых–2017: сб. ст. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2017. С. 115–118.

Antsiferova (Plakhina) D.S., Smirnova A.I. *Pyrolysis of Wastes of Agricultural Crops. Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh – 2017*: Collection of Articles. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2017, pp. 115–118. (In Russ.).

3. Баширов И.И. Получение формованного углеродного адсорбента из нефтяного сырья методами паровой и щелочной активации: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2016. 121 с.

Bashirov I.I. *Production of Molded Carbon Adsorbent from Oil Feedstock by Steam and Alkaline Activation Methods*: Cand. Tech. Sci. Diss. Ufa, 2016. 121 p. (In Russ.).

4. Белецкая М.Г., Богданович Н.И., Макаревич Н.А. Технология углеродных адсорбентов. Физико-химический анализ активных углей. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2015. 96 с.

Beletskaya M.G., Bogdanovich N.I., Makarevich N.A. *Carbon Adsorbent Technology. Physico-Chemical Analysis of Active Carbons*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2015. 96 p. (In Russ.).

5. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Третьяков С.И., Жабин В.И. Планирование эксперимента в примерах и расчетах. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2010. 127 с.

Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Tretyakov S.I., Zhabin V.I. *Experiment Planning in Examples and Calculations*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2010. 127 p. (In Russ.).

6. Евдокимова Е.В. Получение активного угля на основе осиновой древесины: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2020. 111 с.
Evdokimova E.V. *Production of Active Carbon Based on Aspen Wood*: Cand. Tech. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2020. 111 p. (In Russ.).
7. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 592 с.
Keltsev N.V. *Fundamentals of Adsorption Technology*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 592 p. (In Russ.).
8. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Марутовский Р.М., Рода И.Г. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении. М.: Химия, 1983. 288 с.
Koganovskij A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M., Marutovskij R.M., Roda I.G. *Wastewater Treatment and Use in Industrial Water Supply*. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).
9. Кормовые добавки из морских водорослей и продуктов их переработки / под ред. А.В. Подкорытовой. М.: ВНИРО, 2017. 70 с.
Feed Additives from Seaweeds and Their Processed Products. Ed by A.V. Podkorytova. Moscow, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, 2017. 70 p. (In Russ.).
10. Макаревич Н.А. Межфазная граница «газ–жидкость–твердое тело». Архангельск: САФУ, 2018. 411 с.
Makarevich N.A. *Gas-Liquid-Solid Interface Boundary*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2018. 411 p. (In Russ.).
11. Манина Т.С. Получение и исследование высокопористых углеродных сорбентов на основе естественно окисленных углей Кузбасса: дис. ... канд. хим. наук. Кемерово, 2013. 132 с.
Manina T.S. *Production and Research of Highly Porous Carbon Sorbents Based on Naturally Oxidized Coals of Kuzbass*: Cand. Chem. Sci. Diss. Kemerovo, 2013. 132 p. (In Russ.).
12. Мухин В.М., Курилкин А.А., Клущин В.Н. Применение активного угля, модифицированного гидроксидом калия, в очистке сточной воды на действующем предприятии // Сорбцион. и хроматографич. процессы. 2013. Т. 13, вып. 2. С. 188–191.
Mukhin V.M., Kurilkin A.A., Klushin V.N. The Application of Active Carbon Modified by Potassium Hydroxide in the Purification of Waste Water of Functional Entertainment. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*, 2013, vol. 13, iss. 2, pp. 188–191. (In Russ.).
13. Мухин В.М., Тарасов А.В., Клущин В.Н. Активные угли России / под ред. А.В. Тарасова. М.: Металлургия, 2000. 352 с.
Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. *Active Carbons of Russia*. Ed. by A.V. Tarasov. Moscow, Metallurgiya Publ., 2000. 352 p. (In Russ.).
14. Романенко (Хвиюзова) К.А., Богданович Н.И., Канарский А.В. Получение активных углей пиролизом гидролизного лигнина // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 162–171.
Romanenko (Khviuzova) K.A., Bogdanovich N.I., Kanarskiy A.V. Obtaining of Activated Carbons by Pyrolysis of Hydrolytic Lignin. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 4, pp. 162–171. (In Russ.).
15. Славянский А.К., Шарков В.И., Ливеровский А.А. Химическая технология древесины. Гослесбумиздат, 1962. С. 16–18.
Slavyanskij A.K., Sharkov V.I., Liverovskij A.A. *Chemical Technology of Wood*. Goslesbumizdat Publ., 1962, pp. 16–18. (In Russ.).
16. Энтеросорбция / под ред. Н.А. Белякова. Л.: Центр сорбционных технологий, 1991. 336 с.
Enterosorption. Ed. by N.A. Belyakov. Leningrad, Centre of Sorption Technologies Publ., 1991. 336 p. (In Russ.).
17. Bansal R.C., Goyal M. *Activated Carbon Adsorption*. USA, New York, CRC Press, 2005. 520 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028812>

18. Celis de J., Amadeo N.E., Cukierman A.L. In situ Modification of Activated Carbons Developed from a Native Invasive Wood on Removal of Trace Toxic Metals from Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 161, iss. 1, pp. 217–223.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.075>

19. Hayashi J., Kazehaya A., Muroyama K., Watkinson A.P. Preparation of Activated Carbon from Lignin by Chemical Activation. *Carbon*, 2000, vol. 38, iss. 13, pp. 1873–1878.

[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00027-0)

20. Nanda S., Dalai A.K., Berruti F., Kozinski J.A. Biochar as an Exceptional Biore-source for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 2016, vol. 7, pp. 201–235.

<https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>

21. Mustranta A. *Novel Applications of Lipases*. Espoo, University of Turku, VTT Technical Research Centre of Finland, 1995. 83 p.

22. Ramanujan R.V., Purushotham S., Chia M.H. Processing and Characterization of Activated Carbon Coated Magnetic Particles for Biomedical Applications. *Materials Science and Engineering: C*, 2007, vol. 27, iss. 4, pp. 659–664.

<https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.06.007>

23. Rivera-Utrilla J., Sanchez-Polo M., Gómez-Serrano V., Álvarez P.M., Alvim-Ferraz M.C.M., Dias J.M. Activated Carbon Modifications to Enhance its Water Treatment Applications. An Overview. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 187, iss. 1–3, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



Краткое сообщение

УДК 630*5/6

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-180-186

Возрастная реверсия рангового распределения фракций надземной биомассы рода *Salix* L.

*А.А. Парамонов*¹, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

А.А. Карабан^{1,2}, лаборант-исследователь, аспирант; ResearcherID: [ABD-9818-2021](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

В.А. Усольцев^{3,4}✉, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

И.В. Цветков^{1,2}, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAV-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

С.В. Третьяков^{1,2}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

*И.С. Цепордей*⁵, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; vagner93@inbox.ru, karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

³Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Usoltsev50@mail.ru✉

⁴Уральский государственный экономический университет, ул. 8 марта/Народной воли, д. 62/45, г. Екатеринбург, Россия, 620144; Usoltsev50@mail.ru✉

⁵Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.24 / Одобрена после рецензирования 20.06.24 / Принята к печати 25.06.24

Аннотация. Органы растения выполняют множество различных функций. Листья обеспечивают поступление ассимилятов, ствол и ветви – фотосинтез, транспортировку воды и питательных веществ, а корни подают воду и элементы питания и способствуют физической устойчивости. Для достижения оптимальной работы на уровне растения в целом между этими функциями есть некая пропорциональность, которая опосредуется количеством биомассы в органах растения. Соотношение биомассы одного органа с биомассой другого известно как «распределение биомасс», которое является совокупным результатом динамического распределения ассимилятов с течением времени. Некоторыми реализациями распределения фракций биомассы растения являются негауссовские распределения, в частности, распределение Ципфа–Парето. На примере

6 хвойных родов Евразии было установлено, что регрессионный коэффициент уравнения Ципфа–Парето не является постоянным на протяжении всего периода роста растения, а в некотором установленном возрасте меняет знак. Цель настоящего исследования – сформировать базу данных о биомассе рода *Salix* L. и установить возраст реверсии фракций надземной биомассы. Использованы авторские и привлеченные исходные материалы в количестве 94 измерений надземной биомассы ив в возрасте от 1 до 79 лет на территории европейской части России. Исходные данные биомассы фракций ранжированы в убывающей последовательности: ствол, ветви, листья (соответственно i равно 1, 2 и 3) и аппроксимированы моделью в двойных логарифмических координатах, включающей в качестве независимых переменных не только ранг i , но также возраст дерева, его высоту и комбинированную переменную в виде произведения возраста на ранг i . Последняя оказалась статистически значимой на уровне вероятности $P < 0,0001$, а ее отрицательное значение отражает, что в некотором возрасте последовательность фракций надземной биомассы в убывающем порядке: листья, ветви, ствол – меняется на противоположную убывающую последовательность: ствол, ветви, листья – и возраст реверса составляет около 2 лет. Установленный факт возрастного реверса фракций надземной биомассы ивы и определение возраста дерева, в котором происходит реверс, являются вкладом в развитие теории распределения ассимилятов в растениях.

Ключевые слова: *Salix* L., фракции надземной биомассы растения, модель Ципфа–Парето, регрессионный анализ, возрастная реверс рангового распределения фракций

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненной в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы – 123022800113-9).

Для цитирования: Парамонов А.А., Карабан А.А., Усольцев В.А., Цветков И.В., Третьяков С.В., Цепордей И.С. Возрастная реверсия рангового распределения фракций надземной биомассы рода *Salix* L. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 180–186. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-180-186>

Brief report

Age Reversion of the Rank Distribution of Aboveground Biomass Fractions in the Genus *Salix* L.

Andrey A. Paramonov¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Aleksey A. Karaban^{1,2}, Laboratory Assistant–Researcher, Postgraduate;

ResearcherID: [ABD-9818-2021](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

Vladimir A. Usoltsev^{3,4}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Ilya V. Tsvetkov^{1,2}, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAU-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

Sergey V. Tretyakov^{1,2}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Ivan S. Tsepordey⁵, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; vagner93@inbox.ru, karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangel'sk, 163002, Russian Federation; karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

³Ural State Forest Engineering University, Sibirskij Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru✉

⁴Ural State University of Economics, ul. 8 Marta/Narodnoj Voli, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru✉

⁵Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; ivan.tsepordey@yandex.ru

Received on April 17, 2024 / Approved after reviewing on June 20, 2024 / Accepted on June 25, 2024

Abstract. Plant organs perform many different functions. The leaves provide the supply of assimilates, the stem and branches provide photosynthesis, transportation of water and nutrients, and the roots supply water and nutrients and contribute to physical stability. To achieve optimal performance at the plant level as a whole, there is a certain proportionality between these functions, which is mediated by the amount of biomass in the plant organs. The ratio of the biomass of one organ to that of another is known as the “biomass partitioning”, which is the cumulative result of the dynamic distribution of assimilates over time. Some implementations of the distribution of plant biomass fractions are non-Gaussian distributions, in particular, the Zipf-Pareto distribution. Using 6 coniferous genera of Eurasia as an example, it has been established that the regression coefficient of the Zipf-Pareto equation is not constant throughout the entire period of plant growth, but changes its sign at a certain age. The aim of this study has been to create a database on the biomass of the genus *Salix* L. and to determine the age of reversion of aboveground biomass fractions. The authors' and attracted source materials have been used in the amount of 94 measurements of the aboveground biomass of willows aged from 1 to 79 years in the territory of the European part of Russia. The initial data on the biomass fractions have been ranked in descending order: stem, branches, foliage (respectively, i is equal to 1, 2 and 3) and approximated by a model in double logarithmic coordinates, including as independent variables not only the rank i , but also the age of the tree, its height and a combined variable in the form of the product of age by rank i . The latter has turned out to be statistically significant at the probability level of $P < 0.0001$, and its negative value reflects that at a certain age the sequence of fractions of aboveground biomass in descending order: leaves, branches, stem – changes to the opposite descending sequence: stem, branches, leaves – and the age of the reverse is about 2 years. The established fact of age-related reversal of fractions of the aboveground willow biomass and the determination of the age of the tree in which the reversal occurs are a contribution to the development of the theory of assimilate distribution in plants.

Keywords: *Salix* L., fractions of the aboveground plant biomass, the Zipf-Pareto model, regression analysis, age reversal of the rank distribution of fractions

Acknowledgements: The publication was prepared based on the results of research carried out within the framework of the state assignment of the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” for applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency (topic registration no. 123022800113-9).

For citation: Paramonov A.A., Karaban A.A., Usoltsev V.A., Tsvetkov I.V., Tretyakov S.V., Tsepordey I.S. Age Reversion of the Rank Distribution of Aboveground Biomass Fractions in the Genus *Salix* L. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 180–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-180-186>

Введение

Органы растения выполняют различные функции. Листья отвечают за поступление ассимилятов, стволы и ветви – за фотосинтез и транспортировку воды и питательных веществ, а корни подают воду и элементы питания, обеспечивают физическую устойчивость [12, 14, 16]. Для достижения оптимального функционирования на уровне растения в целом, между этими функциями должна быть определенная пропорциональность, поскольку все они необходимы для роста и размножения [13, 17–20]. Эта пропорциональность частично зависит от количества биомассы в органах растения. Для описания соотношений биомассы одного органа с биомассой другого или растения в целом применяется термин «распределение биомасс». Этот термин не имеет прямого отношения к динамическому распределению вновь образовавшихся ассимилятов по различным органам растения, однако фактическое распределение наличной биомассы между органами растения в данный момент времени является совокупным результатом динамического распределения ассимилятов на протяжении некоторого периода или всего жизненного цикла растения [8, 10, 11, 15].

Некоторыми реализациями распределения фракций биомассы растений являются негауссовские распределения, в частности, распределение Ципфа–Парето [4]:

$$\ln P_j = a - b \ln i,$$

где P_j – фитомасса j -й фракции (ствол, корни, ветви, листва или хвоя), кг; i – ранг фракции, т. е. ее порядковый номер в убывающем ряду: ствол, корни, ветви, листва или хвоя; a – свободный член; b – коэффициент конкуренции за ресурс. Названное распределение было реализовано в нескольких приложениях [1, 4, 5, 9]. А.С. Комаров с соавт. [1] обратили внимание на то, что в начальный период роста растение характеризуется реверсным распределением биомасс в убывающем порядке: листва, корни, ветви, ствол. Они отметили, что установление возраста, при котором происходит реверс названных распределений, является приоритетным направлением дальнейших исследований в плане развития теории распределения ассимилятов в растениях. Недавно подобное исследование было выполнено на примере 6 хвойных родов Евразии, и установлен возраст реверса их биомасс в диапазоне от 2 до 7 лет [6]. Для лиственных видов таких научных работ не проводилось.

Цель – сформировать базу данных о биомассе рода *Salix* L. и установить возраст реверсии биомасс надземных фракций.

Объекты и методы исследования

Исходные материалы содержали 94 измерения надземной биомассы ив. Из них данные, полученные авторами, включают 17 измерений побегов на черенках в возрасте от 1 до 2 лет (Архангельская область), 3 экземпляра подроста в возрасте от 5 до 13 лет (Урал) и 52 дерева из естественных древостоев в возрасте от 15 до 70 лет (Архангельская область) [2]. Кроме того, привлечены данные В.В. Смирнова [3] для Новгородской и Вологодской областей в количестве 22 деревьев в возрасте от 13 до 79 лет. Исследованы виды *Salix myrsinifolia* Salisb., *S. gmelinii* Pall., *S. carpea* L., *S. borealis* Fries. Диапазоны исходных значений таксационных показателей и надземной биомассы ивы были следующие:

ми: возраст – 1...79 лет; высота – 0,24...17,7 м; биомасса листвы, ветвей, ствола соответственно – 0,00058...4,4; 0,00030...27,8; 0,00041...74,6 кг.

Исходные данные ранжированы в убывающей последовательности: ствол, ветви, листва (соответственно i равно 1, 2 и 3) – и обработаны методом многофакторного анализа согласно структуре рекурсивных моделей, апробированной ранее [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Получена рекурсивная система 2 моделей:

$$\ln H = -1,3180 + 1,6755 \ln A - 0,1797 (\ln A)^2, \text{ adj}R^2 = 0,966, \text{ SE} = 0,196; \quad (1)$$

$$\ln P_j = -5,2340 + 2,2982 \ln H + 0,7922 \ln A + 0,2909 \ln i - 0,9319 \ln A \ln i, \\ \text{adj}R^2 = 0,932, \text{ SE} = 0,826, \quad (2)$$

где $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка моделей.

Свободный член в (1) и (2) скорректирован на логарифмическую трансформацию [7]. В моделях (1) и (2) независимые переменные объясняют 93...97 % изменчивости зависимых переменных, и остаточная дисперсия в размере от 3 до 7 % приходится на совокупность неучтенных факторов (типы леса, густота древостоев, природная зональность и пр.).

Последовательным табулированием моделей (1) и (2) получены расчетные значения, по которым построена 3D-поверхность, представляющая зависимость фракции биомассы дерева от ее ранга и возраста дерева (рис. 1).

Из результатов табулирования моделей (1) и (2) взяты значения биомассы в узком диапазоне возраста, примерно соответствующем реверсу биомасс, и построена 3D-поверхность (рис. 2). Из графических данных следует, что реверс распределения фракций биомассы приходится на возраст около 2 лет.

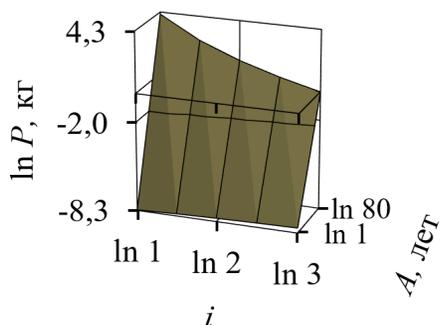


Рис. 1. Графическая интерпретация модели возрастного реверса связи биомассы фракций с ее рангом

Fig. 1. The graphical interpretation of the age reversal model of the correlation of biomass fractions with its rank

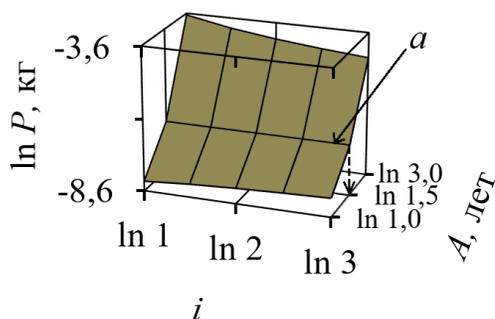


Рис. 2. Расчетная 3D-поверхность, показывающая, в каком возрасте достигается реверс биомасс фракций деревьев (a – линия, параллельная оси $(\ln i)$, соответствует возрасту (пунктирная стрелка) равенства фракций биомассы между собой)

Fig. 2. The calculated 3D-surface showing the age at which the reversal of biomass fractions of trees is achieved (a – a line parallel to the axis $(\ln i)$, corresponding to the age (dotted arrow) of equality of biomass fractions among themselves)

Заключение

Таким образом, на примере рода *Salix* L. показано, что уравнение Ципфа–Парето не работает на всем возрастном диапазоне деревьев, и спустя какое-то количество лет с начала роста его регрессионный коэффициент меняет знак. Этот возраст реверса биомасс фракций установлен и равен примерно 2 годам.

Наличие возрастного реверса фракций надземной биомассы ив и возраста дерева, в котором происходит реверс, можно рассматривать в качестве вклада в развитие теории распределения ассимилятов в растениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Комаров А.С., Гинжул Л.К., Шанин В.Н., Быховец С.С., Бобкова К.С., Кузнецов М.А., Манов А.В., Осипов А.Ф. Особенности распределения биомассы бореальных видов деревьев по фракциям // Изв. РАН. Сер.: Биологич. 2017. № 6. С. 76–84.

Komarov A.S., Ginzbul L.K., Shanin V.N., Bykhovets S.S., Bobkova K.S., Kuznetsov M.A., Manov A.V., Osipov A.F. Pattern of Biomass Partitioning into Fractions of Boreal Trees. *Izvestiya RAN. Seriya: Biologicheskaya = Biology Bulletin*, 2017, vol. 44, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1134/S1062359017060061>

2. Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С. Биомасса деревьев ивы и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 4. С. 10–19.

Paramonov A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. Willow Tree Biomass and its Allometric Models in the Conditions of the Arkhangelsk Region. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh = Forests of Russia and Economy in Them*, 2022, no. 4, pp. 10–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.51318/FRET.2022.27.41.002>

3. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 362 с.

Smirnov V.V. *Organic Matter in Some Forest Phytocenoses of the European Part of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 362 p. (In Russ.).

4. Соловьев В.А., Нян Ч.Т.Т., Шорохова Е.В. Распределение углерода по фракциям фитомассы различных древостоев и лесного массива // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2012. Вып. 198. С. 33–40.

Soloviev V.A., Nyan Ch.T.T., Shorokhova E.V. Carbon Distribution by Phytomass Fractions of Various Stands and Woodlands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2012, iss. 198, pp. 33–40. (In Russ.).

5. Суховольский В.Г. Распределение фитомассы деревьев по фракциям и оценка биопродуктивности деревьев и насаждений // Лесоведение. 1996. № 1. С. 30–40.

Sukhovol'skij V.G. Distribution of Tree Phytomass by Fractions and Assessment of Bioproductivity of Trees and Plantings. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1996, no. 1, pp. 30–40. (In Russ.).

6. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Ранговое распределение фракций фитомассы деревьев в новом освещении // Сиб. лесн. журн. 2023. № 4. С. 41–51.

Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Rank Distribution of a Tree Phytomass Fractions in New Interpretation. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2023, no. 4, pp. 41–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20230404>

7. Baskerville G.L. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2, no. 1, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1139/x72-009>

8. Delerue F., Scattolin M., Atteia O., Cohen G.J.V., Franceschi M., Mench M. Biomass Partitioning of Plants under Soil Pollution Stress. *Communications Biology*, 2022, vol. 5, art. no. 365. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03307-x>
9. Delong V.A. *Zipf's Law and Zeta Distribution*: Bachelor Thesis. Prague, Czech Technical University in Prague, 2011. 42 p.
10. Deng C., Ma F., Xu X., Zhu B., Tao J., Li Q. Allocation Patterns and Temporal Dynamics of Chinese Fir Biomass in Hunan Province, China. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 2, art. no. 286. <https://doi.org/10.3390/f14020286>
11. Dolezal J., Jandova V., Macek M., Liancourt P. Contrasting Biomass Allocation Responses across Ontogeny and Stress Gradients Reveal Plant Adaptations to Drought and Cold. *Functional Ecology*, 2021, vol. 35, iss. 1, pp. 32–42. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13687>
12. Duanmu Z., Zhu Z., Zhao W., Chen A., Wang Z., Cao S., Li D., Luo Y., Myne R.B. Changes in Leaf and Root Carbon Allocation of Global Vegetation Simulated by the Optimally Integrated Ecosystem Models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, vol. 362, art. no. 110366. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110366>
13. Freschet G.T., Swart E.M., Cornelissen J.H.C. Integrated Plant Phenotypic Responses to Contrasting Above- and Below-Ground Resources: Key Roles of Specific Leaf Area and Root Mass Fraction. *New Phytologist*, 2015, vol. 206, iss. 4, pp. 1247–1260. <https://doi.org/10.1111/nph.13352>
14. Liu R., Yang X., Gao R., Hou X., Huo L., Huang Z., Cornelissen J.H.C. Allometry Rather than Abiotic Drivers Explains Biomass Allocation among Leaves, Stems and Roots of *Artemisia* across a Large Environmental Gradient in China. *Journal of Ecology*, 2021, vol. 109, iss. 2, pp. 1026–1040. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13532>
15. Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does Biomass Allocation Change with Size and Differ among Species? An Analysis for 1200 Plant Species from Five Continents. *New Phytologist*, 2015, vol. 208, iss. 3, pp. 736–749. <https://doi.org/10.1111/nph.13571>
16. Skarpaas O., Meineri E., Bargmann T., Pötsch C., Töpper J., Vandvik V. Biomass Partitioning in Grassland Plants along Independent Gradients in Temperature and Precipitation. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2016, vol. 19, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2016.01.006>
17. Temme A.A., Liu J.C., Cornwell W.K., Aerts R., Cornelissen J.H.C. Hungry and Thirsty: Effects of CO₂ and Limited Water Availability on Plant Performance. *Flora*, 2019, vol. 254, pp. 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.11.006>
18. Tsogetsai Khan T., Yang X., Gao R., Liu J., Tang W., Liu G., Ye X., Huang Z. Biomass Allocation between Reproductive and Vegetative Organs of *Artemisia* along a Large Environmental Gradient. *BMC Plant Biology*, 2025, vol. 25, art. no. 27. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-06030-3>
19. Umaña M.N., Needham J., Fortunel C. From Seedlings to Adults: Linking Survival and Leaf Functional Traits over Ontogeny. *Ecology*, 2025, vol. 106, iss. 1, art. no. e4469. <https://doi.org/10.1002/ecy.4469>
20. Vasseur F., Exposito-Alonso M., Ayala-Garay O.J., Wang G., Enquist B.J., Vile D., Violle C., Weigel D. Adaptive Diversification of Growth Allometry in the Plant *Arabidopsis thaliana*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, vol. 115, iss. 13, pp. 3416–3421. <https://doi.org/10.1073/pnas.1709141115>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*15:630*43+630*34+630*611

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-187-197

Лесоводственные основы технологий освоения товарных горельников после низовых пожаров

С.А. Денисов[✉], *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID*: [ADB-0277-2022](https://orcid.org/0000-0002-8805-1253),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8805-1253>

З.Н. Домрачева, *канд. с.-х. наук*; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-3381-680X>

М.Н. Волдаев, *канд. техн. наук*; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-3339-8081>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; DenisovSA@volgatech.net[✉], DomrachevaZN@volgatech.net, VoldaevMN@volgatech.net

Поступила в редакцию 27.12.24 / Одобрена после рецензирования 11.01.25 / Принята к печати 15.01.25

Аннотация. Сосновые леса левобережья Волги между Нижним Новгородом и Казанью сформировались на песчаных почвах и отличаются высокой пожарной опасностью, что осложняет их охрану и восстановление. В условиях изменяющегося климата и увеличения частоты крупных пожаров необходима разработка эффективных методов ликвидации их последствий. Цель исследования – обоснование лесоводственных требований к организации лесосечных работ на горельниках с обеспечением баланса заготовки древесины и содействием естественному восстановлению сосны. Объект исследования – товарные горельники сосновых древостоев в Республике Марий Эл. Установлено, что демутиационные процессы на гарях 1921, 1972, 2010 и 2021 гг. в условиях борового ряда протекали стабильно с доминированием сосны. Всхожесть семян сосны, полученных из шишек после низовых пожаров 2010 и 2021 гг., составляла 40–80 %, что коррелирует с интенсивностью пирогенного воздействия. Разработаны лесоводственные рекомендации по эффективному использованию постпирогенного семенного потенциала сосны, включающие 2-приемные санитарные рубки котловинным методом для снижения риска ветровалов и иссушения почвы. Котловинными рубками в первые 8 мес. после пожара рекомендуется вырубать 50 % запаса древесины в горельниках, а через 15–20 мес. после пожаров проводить финальные рубки по снежному покрову. Минерализация почвы и котловинные рубки товарных горельников могут обеспечить благоприятные условия укоренения всходов и снизить их элиминацию от возможного недобора осадков. Это позволит сократить потери товарной древесины и сохранить местные популяции сосны, значительно уменьшив объемы искусственного лесовосстановления.

Ключевые слова: товарные горельники, лесные пожары, первичный постпирогенный семенной потенциал сосны, санитарные рубки, котловинные рубки, Республика Марий Эл

Для цитирования: Денисов С.А., Домрачева З.Н., Волдаев М.Н. Лесоводственные основы технологий освоения товарных горельников после пожаров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 187–197. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-187-197>

Original article

Silvicultural Principles of the Technologies for the Management of Commercial Burnt Stands after Ground Fires

Sergey A. Denisov[✉], Doctor of Agriculture; ResearcherID: [ADB-0277-2022](https://orcid.org/0000-0002-8805-1253),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8805-1253>

Zulfiya N. Domracheva, Candidate of Agriculture; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3381-680X>

Maksim N. Voldaev, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3339-8081>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; DenisovSA@volgatech.net[✉], DomrachevaZN@volgatech.net,

VoldaevMN@volgatech.net

Received on December 27, 2024 / Approved after reviewing on January 11, 2025 / Accepted on January 15, 2025

Abstract. The pine forests on the left bank of the Volga River between Nizhny Novgorod and Kazan have developed on sandy soils and are highly susceptible to fire, making their protection and restoration difficult. In the context of a changing climate and an increasing frequency of large fires, it is necessary to develop effective methods for eliminating their consequences. The aim of the research has been to substantiate forestry requirements for the organization of logging operations in burnt stands, ensuring a balance of wood harvesting and promoting the natural restoration of pine trees. Commercial burnt pine stands of the Republic of Mari El have been chosen as a research object. It has been established that the demutation processes in the burnt areas of 1921, 1972, 2010 and 2021 under the conditions of the pine forest row have proceeded stably with the dominance of pine. The germination rate of pine seeds obtained from cones after the ground fires in 2010 and 2021 has been 40–80 %, which correlates with the intensity of the pyrogenic impact. Silvicultural recommendations have been developed for the effective use of the post-pyrogenic seed potential of pine, including 2-step sanitary felling using the gap-based method to reduce the risk of windfalls and soil drying out. It is recommended to cut down 50 % of the wood stock in burnt stands using the gap-based method in the first 8 months after a fire, and to carry out final felling on the snow cover 15–20 months after the fires. Soil mineralization and gap-based felling of commercial burnt stands can provide favorable conditions for the rooting of seedlings and reduce their elimination from possible precipitation shortages. This will reduce the loss of commercial wood and preserve local pine populations, significantly reducing the volume of artificial reforestation.

Keywords: commercial burnt stands, forest fires, primary post-pyrogenic seed potential of pine, sanitary felling, gap-based felling, the Republic of Mari El

For citation: Denisov S.A., Domracheva Z.N., Voldaev M.N. Silvicultural Principles of the Technologies for the Management of Commercial Burnt Stands after Ground Fires. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 187–197.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-187-197>

Введение

Сосновые леса на песчаных отложениях левобережья Волги между Нижним Новгородом и Казанью занимают 34 % площади лесов. Они отличаются высокой пожарной опасностью, создавая проблемы в профилактике пожаров,

их тушении и ликвидации последствий. Только за последние 100 лет, в 1921, 1972, 2010, 2021 гг., происходили крупные пожары, часть которых подробно описана в научной литературе [9]. Из-за климатических изменений вероятность таких событий растет, а интервалы между ними сокращаются [29, 30], что повышает актуальность решения проблем по ликвидации последствий крупных лесных пожаров [6].

Пожары 1921 г. в Республике Марий Эл привели к гибели сосновых и еловых древостоев с объемом древесины 21,4 млн м³ (госархив Республики Марий Эл, фонд 306, опись 1, дело 201). К 1924 г. было вырублено 1,10 млн м³ товарной древесины на сплав и 0,61 млн м³ – местным населением, что составило 8,0 % от запасов погибших древостоев. Остальные 92 % запаса древесины в дальнейшие годы быстро теряли свою товарность. Через 5 лет после пожара 1921 г. 100 % мертвой сосновой древесины было поражено грибами против 15 % в сосняках, сохранивших жизнеспособность [24].

Процесс восстановления сосны, по предположению Л.И. Яшнова и А.П. Петрова [15, 25], мог происходить за счет дозревших после июльских пожаров семян в погибших насаждениях. Эта особенность сосны, вероятно, сказалась на параметрах лесного фонда Республики, когда к 1940 г. 25 % сосновых лесов были представлены молодняками (84,8 тыс. га), что сопоставимо с площадью полностью погибших в пожарах 1921 г. древостоев (109,4 тыс. га). Лесокультурные приемы восстановления лесов на горях стали широко внедряться после 1932 г. [13], когда были получены их успешные результаты.

После пожаров 1972 г. (180 тыс. га) запасы древесины в товарных горельниках оценивались в 4,9 млн м³, 78 % которых за 2 года было разработано силами Росколхозстрой-объединения РФ и Украины [21]. Общий объем лесовосстановительных работ в 1972–1973 гг. составил 67,0 тыс. га лесных культур.

Уже через год после пожара сортность древесины сосны снизилась на 18–64 %, хотя физико-механические свойства сохраняются в первые 2 года [2, 12, 23, 28]. Теплотворная способность постпирогенной древесины сосны делает ее перспективным сырьем как биотопливо [14, 22, 27], а время перехода древесины сосны в категорию дров составляет 7–8 лет [9].

К осени 5-го года после пожаров густота подроста сосны в условиях боров часто превышала 5 тыс. шт./га, что обеспечивалось формированием хвойных молодняков рубками ухода [3], а почти на всех обследованных участках неразработанных горельников наблюдалось успешное естественное возобновление сосны [9].

Способность растений восстанавливать свои популяции после пожаров интересовала многих исследователей. Так, в Средиземноморье изучался порог выживаемости семян рода сосны [30–32], который экспериментально определен в 110 °С в течение 5 мин. [26]. Крупные семена и видовые особенности (например, у сосны канарской) смягчают негативное влияние пожаров [27, 28]. Нами экспериментально [7], а затем и в природных условиях оценена способность семян сосны обыкновенной сохранять всхожесть после низовых пожаров разной интенсивности [5]. Это дает основание для использования первичного (начального) постпирогенного семенного потенциала сосны в качестве альтернативы искусственному лесовосстановлению на горях. Для

реализации этого подхода необходима разработка специализированных технологий.

Цель работы – обосновать лесоводственные требования к лесосечным работам в горельниках с обеспечением максимального выхода товарной древесины и естественного восстановления сосны за счет ее начального постпирогенного семенного потенциала. Эффективное освоение горельников требует решения 2 основных задач: 1) организации и проведения лесосечных работ в товарных горельниках в оптимальные сроки при минимальных потерях древесины и 2) активизации естественного возобновления сосны за счет первичного послепожарного семенного потенциала.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стали товарные горельники сосняков брусничного типа леса (A_2) на территории Учебно-опытного лесничества Поволжского государственного технологического университета (Республика Марий Эл) после крупного лесного пожара 2021 г. на площади 1400 га. На площади 100 га (кв. 95 Чернушкинского лесного участка) был оценен лесовосстановительный потенциал сосны после низовых пожаров.

Методика исследования, описанная в наших работах [5–7], включала экспериментальную и фактическую характеристику всхожести семян из крон погибших деревьев сосны после низовых пожаров разной интенсивности в молодняках и семеносящих древостоях. Учет количества опадающих семян в поврежденных огнем древостоях выполнен с помощью семеномеров, а их всхожесть определена по ГОСТ 13056.6–97. Наблюдение за всходами и самосевом выполнялось в 2022–2024 гг. в 10 таксационных выделах на 294 постоянных круговых учетных площадках размером по 10 м², зафиксированных на местности и привязанных к географическим координатам.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ публикаций и собственные исследования показали, что сценарии демулационных процессов на гарях 1921, 1972, 2010 гг. в боровых условиях повторяются, они довольно стабильны и протекают с доминированием сосны [3, 6, 17, 18]. При этом выявленная нами экспериментально и подтвержденная полевыми исследованиями способность семян сосны сохранять жизнеспособность после пожаров представляет собой первичный постпирогенный потенциал ее естественного возобновления [5], который необходимо учитывать при адаптации технологий и комплексов машин к разработке товарных горельников. По результатам мониторинга густоты подроста был подтвержден закономерный процесс его накопления в выделах, где древостои в момент пожара были семеносящие (табл. 1).

Древостои в выделах 23в и 24в подверглись рубке осенью, что, вероятнее всего, и послужило причиной отсутствия подроста. В других выделах рубки приводились по снежному покрову.

Так, при сплошных санитарных рубках товарных горельниках после лесопатологического обследования должны быть учтены следующие лесоводственные положения.

Таблица 1

**Густота подроста после низового пожара 2021 г. в кв. 95
Чернушкинского лесного участка УОЛ ПГТУ (по учету осенью 2024 г.)**
**The undergrowth density after the 2021 ground fire in sq. 95 of the Chernushkinsky
Forest Compartment of the Educational and Experimental Forestry of the Vologda
State University of Technology (as recorded in autumn 2024)**

№ вы-дела	Учетная площадь, шт.	Интенсивность пожара	Возраст древостоя, лет	Густота (тыс. шт./га) сосны в возрасте, лет				Береза	Осина	Всего
				1	2	3	Итого			
1п	43	Инт.	105	2,84	1,56	0,07	4,47	0,37	0	4,84
1в	49	Инт.	105	0,60	1,70	1,64	3,94	0,24	0,86	5,04
2в	65	Инт.	105	0,35	0,72	0,52	1,51	0,16	0,22	1,89
8в	36	Инт.	90	0,22	1,03	1,11	2,36	0,03	0,08	2,47
13п	10	Инт.	80	1,40	3,00	0,80	5,20	0,90	0	6,10
18п	10	Инт.	100	1,30	4,10	0,70	6,1	0,70	0	6,80
20в	20	Ср.	105	0,30	1,70	0,40	2,40	0,10	0	2,50
22п	23	Ср.	70	1,00	1,30	0,20	2,50	0,27	0,08	2,85
23в	22	Ср.	60	0,10	0,29	0	0,38	0	0	0,38
24в	16	Ср.	70	0	0	0	0	0	0	0

Примечание: п – под пологом горельника; в – сплошная вырубка; Инт., Ср. – интенсивный и средний соответственно.

1. *Наличие семян и их источники.* Разработке товарных горельников припевающих и более старших древостоев должна предшествовать оценка первичного потенциала семенного возобновления за счет семян, сохранивших жизнеспособность после пожаров [4, 5, 10]. Об урожае семян сосны в год пожара можно судить либо по непосредственному учету семян в горельнике методом модельных деревьев, либо иными приемами [20]. Средний урожай семян сосны, по данным [11], составляет около 2 кг/га, или 0,25–0,50 млн. шт./га. Непосредственный учет в горельниках 2010 г. показал, что урожай семян составил 0,5 млн. шт./га [6], а в горельниках 2021 г. семян насчитывалось от 0,4 до 1,0 млн. при массе их 1000 шт. 6,04±0,28 г [5].

Семена первичного постпирогенного урожая сосны весной после пожара дают первую волну всходов. Всходы сосны на 2-й год после пожара появляются, вероятно, либо за счет семян, не проросших в 1-й год после пожара, либо от живых стен леса. Возможно поступление семян в ограниченном количестве с сохранившихся живых деревьев, хотя у таких деревьев нарушается процесс закладки генеративных почек и оплодотворение женских шишек [8], что резко снижает возобновляемость сосны в 2–5 раз [19], отодвигая на 3–4 года полноценное семеношение. В связи с этим особенно важно использовать для лесовосстановления первичный постпирогенный семенной потенциал сосны.

2. *Всхожесть семян, переживших пожар.* Семена, сохранившие жизнеспособность после пожара, составляют первичный потенциал семенного возобновления. Наиболее точно его можно оценить после сбора семян с модельных деревьев по ГОСТ 13056.6–97. Всхожесть семян, защищенных кроющими чешуями шишек и переживших низовые пожары, колеблется в значительных пределах, но в целом находится на высоком уровне (40–80 %). Эта зависимость выражается линейным уравнением с использованием в качестве предиктора процентного соотношения высоты нагара к высоте дерева [5]:

для молодняков: $Y = 107,870 - 0,988(100h_n/h_d)$, $R^2 = 0,829$, $p = 0,00002$;

для спелых древостоев: $Y = 113,770 - 1,123(100h_n/h_d)$, $R^2 = 0,648$, $p = 0,00280$,

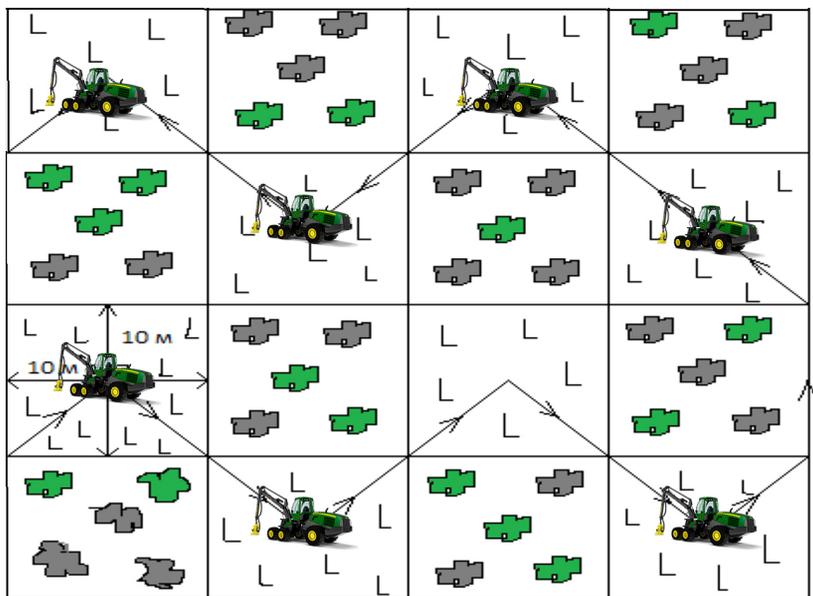
где h_n , h_d – высота нагара и дерева соответственно, м.

3. *Ложь для семян.* Семена, выжившие при пожарах, для того чтобы прорасти, должны оказаться на минерализованной поверхности почвы, это обеспечивается либо значительной степенью прогара подстилки при сильных низовых пожарах, либо дополнительной минерализацией поверхности почвы [1, 14, 16]. Наиболее благоприятные условия для прорастания семян и укоренения всходов складываются в минеральном горизонте, имеющем более стабильный водный режим. Для удержания влаги в верхних горизонтах почвы необходимо ее притенение, что особенно важно для сосны на этапе формирования корневой системы. Поэтому вырубку древостоя следует осуществлять таким образом, чтобы на освобожденной от деревьев площади в полуденные часы была тень, и лучшим вариантом в этом случае могут быть котловинные рубки.

4. *Сроки проведения санитарной рубки товарных горельников.* Данный этап работ лучше всего увязать со временем опадения семян сосны с апреля по 1-ю декаду июля следующего за пожаром года. Выборочные санитарные рубки в горельниках со слабым прогоранием подстилки следует проводить, совмещая их с активной минерализацией почвы в бесснежный период с сентября по май, когда начинают появляться всходы сосны.

Для использования первичного постпирогенного семенного потенциала сплошные (котловинные) санитарные рубки необходимо проводить в 2 приема. Первый – в течение 8 мес. (сентябрь–апрель) после пожара, убирая 50 % запаса древесины. Второй – по снежному покрову спустя 15–16 мес. после пожара для сохранения накопившихся всходов.

5. *Предотвращение ветровалов.* Исключить опасность ветровалов в разрабатываемых горельниках можно рубкой небольших делянок с шахматным примыканием (вариант котловинных рубок) площадью 0,04 га (см. рисунок).



Общая схема вырубki товарного горельника

The general diagram of commercial burnt stand felling

6. *Вывозка (трелевка) древесины с лесосек и очистка вырубок.* При санитарных рубках в бесснежный период возможна трелевка деревьев с кронами с целью дополнительной минерализации поверхности почвы до середины мая. Это уменьшит трудности по последующей очистке лесосек и лесовосстановлению. Ветви с наличием шишек желательно распределить по площади вырубки или оставить на месте валки дерева. В любом случае заготовка древесины не должна сопровождаться утерей семян, находящихся в шишках.

7. *Оценка успешности естественного возобновления сосны по результатам рубок.* Такую оценку на разработанных площадях горельников необходимо проводить на 3-й год после пожара, что дает возможность уделить внимание проблемным участкам вырубок. Центры круговых учетных площадок, размером в 10 м², фиксируются на местности. На 5-й год оценка подроста производится на тех же площадках с учетом действующих «Правил лесовосстановления». Подроста сосны в количестве 5 тыс. шт./га обычно достаточно для получения при помощи лесоводственных уходов лиственнично-сосновых и сосновых молодняков для всех типов лесорастительных условий.

На основании перечисленных 7 лесоводственных положений необходимо адаптировать существующие способы разработки лесосек к лесоводственным свойствам сосны и ее первичному постпирогенному семенному потенциалу (табл. 2).

Таблица 2

Сетевой график 2-приемных санитарных рубок товарных горельников на крупных горях котловинным способом (на 6-й год по снежному покрову удаляются семенные деревья, выполнившие свою функцию)
The network schedule of 2-stage sanitary felling of commercial burnt stands in large burnt areas using the gap-based method (in the 6th year, seed trees that have fulfilled their function are removed over snow cover)

Год после пожара	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0	-	-	-	-	-	-	Пожары		ЛПО	ЛПО	ЛПО	-
	-	-	-	-	-	-			Начало 1-го приема рубок			
	-	-	-	-	-	-			Очистка вырубок			
1	*	*	*	Налет семян постпирогенного урожая			ЛПО	ЛПО	ЛПО	*	*	
	Продолжение 1-го приема рубок			Накопление всходов						2-й прием рубок		
	Очистка вырубок									Очистка вырубок		
2	*	*	*	Налет семян с оставленных живых деревьев и живых стен леса			ЛПО	ЛПО	ЛПО	*	*	
	2-й прием рубок			Накопление всходов и самосева						2-й прием рубок		
	Очистка вырубок									Очистка вырубок		
3	*	*	*	Налет семян с оставленных живых деревьев и живых стен леса			ЛПО	ЛПО	ЛПО	*	*	
	Удаление отдельных усохших деревьев			Накопление подроста						*	*	

Окончание табл. 2

Год после пожара	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
4	*	*	*	Налет семян с оставленных живых деревьев и живых стен леса				ЛПО	ЛПО	ЛПО	*	*
				Накопление подроста								
5	*	*	*	Налет семян с оставленных живых деревьев и живых стен леса				ЛПО	ЛПО	ЛПО	*	*
				Накопление подроста								
6	*	*	*	Налет семян с оставленных живых деревьев и живых стен леса				ЛПО	ЛПО	ЛПО	*	*
	Удаление семенных деревьев			Накопление подроста								

Примечание: ЛПО – лесопатологическое обследование; * – наличие устойчивого снежного покрова.

Заключение

Задача сбалансированности получения максимального выхода товарной древесины и естественного восстановления сосны на крупных гарях может быть решена на базе перечисленных в статье лесоводственных положений, в основе которых находится первичный постпирогенный семенной потенциал сосны. Для наилучшего использования сохраняющегося после пожаров семенного потенциала рекомендуется проводить санитарные рубки котловинным способом в 2 этапа: 1-й – в течение первых 8 мес. и второй – спустя 15–16 мес. после пожара по снежному покрову. Это будет способствовать накоплению подроста и минимизации потери товарной древесины.

Необходима разработка лесозаготовительных технологий, отвечающих перечисленным лесоводственным положениям, для обеспечения ликвидации последствий крупных лесных пожаров без масштабных затрат на лесные культуры сосны с возможностью заготовки максимума товарной древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Буряк Л.В., Агеев А.А., Салцевич Ю.В. Технологии лесовосстановления горельников в лесных районах Сибири: методич. рекомендации. Пушкино: ВНИИЛМ, 2021. 64 с.
Buryak L.V., Ageev A.A., Saltsevich Yu.V. *Technologies for Reforestation of Burned Areas in Forest Regions of Siberia: Methodological Guidelines*. Pushkino, All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, 2021. 64 p. (In Russ.).
2. Дворецкий М.Л., Алексеев П.В., Мамаев И.В., Пчелин В.И. Влияние пожаров 1972 года на товарную структуру соснового древостоя и некоторые физико-механические качества древесины // Проблемы ликвидации последствий лесных пожаров 1972 г. в Марийской АССР. Йошкар-Ола: Марийск. кн. изд-во, 1976. С. 110–113.
Dvoretckij M.L., Alekseev P.V., Mamaev I.V., Pchelin V.I. The Impact of the 1972 Fires on the Commercial Structure of Pine Stands and Some Physical and Mechanical Properties of Wood. *Problemy likvidatsii posledstvij lesnykh pozharov 1972 g. v Marijskoj ASSR*. Yoshkar-Ola, Mari Book Publ. House, 1976, pp. 110–113. (In Russ.).

3. Денисов С.А. Регулирование роли березы в естественном возобновлении гарей // Лесн. хоз-во. 1979. № 7. С. 19–21.

Denisov S.A. Regulating the Role of Birch in the Natural Regeneration of Burnt Areas. *Lesnoe khozyajstvo*, 1979, no. 7, pp. 19–21. (In Russ.).

4. Денисов С.А., Домрачева З.Н., Демичева Н.В. Эколого-лесоводственные особенности естественного возобновления сосны на гарях лесного Среднего Заволжья // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 1(49). С. 47–63.

Denisov S.A., Domracheva Z.N., Demicheva N.V. Ecological and Silvicultural Peculiar Features of Natural Regeneration of Pine Trees on the Fire-Sites of Forest Middle Trans-Volga Region. *Vestnik Povolzhskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2021, no. 1(49), pp. 47–63. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.1.47>

5. Денисов С.А., Домрачева З.Н., Мотова К.А., Ожиганов М.А., Чиликова С.А. Влияние пожара в сосняке брусничном на всхожесть и качественные особенности семян сосны // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 2(54). С. 26–39.

Denisov S.A., Domracheva Z.N., Motova K.A., Ozhiganov M.A., Chilikova S.A. The Impact of Fire in a Vaccinium-Type Pine Forest on the Germination and Quality Characteristics of Pine Seeds Mortality. *Vestnik Povolzhskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2022, no. 2(54), pp. 26–39. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.2.26>

6. Денисов С.А., Конюхова Т.А., Рачкова Т.С. Управление лесовосстановлением на гарях // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 3(27). С. 5–17.

Denisov S.A., Konukhova T.A., Rachkova T.S. Forest Restoration Management at the Fire Sites. *Vestnik Povolzhskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2015, no. 3(27), pp. 5–17. (In Russ.).

7. Денисов С.А., Шакирова З.Н. Влияние температурных условий низового пожара на всхожесть семян сосны обыкновенной // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 4(36). С. 35–47.

Denisov S.A., Shakirova Z.N. Influence of Thermal Conditions of Creeping Fire on Viability of Scots Pine Seeds. *Vestnik Povolzhskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2017, no. 4(36), pp. 35–47. (In Russ.).

8. Иозус А.П., Зеленьяк А.К., Колесова О.Н. Особенности цветения и плодоношения сосны обыкновенной в Нижнем Поволжье // Современ. проблемы науки и образования. 2012. № 6. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7628> (дата обращения: 12.05.25).

Iozus A.P., Zelenyak A.K., Kolesova O.N. *Features of Flowering and Fruiting of Scots Pine in the Lower Volga Region. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education, 2012, no. 6. (In Russ.).

9. Калинин К.К. Крупные лесные пожары в лесном Среднем Заволжье и система лесохозяйственных мероприятий по ликвидации их последствий. Йошкар-Ола: Поволж. гос. технол. ун-тет, 2012. 364 с.

Kalinin K.K. *Large-Scale Forest Fires in the Middle Volga Forest Region and the System of Forestry Measures to Eliminate Their Consequences*. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2012. 364 p. (In Russ.).

10. Коба В.П., Жигалова Т.П. Экспериментальная оценка постпирогенной жизнеспособности семян сосны Палласа // Лесоведение. 2018. № 6. С. 417–425.

Koba V.P., Zhigalova T.P. *Experimental Assessment of Post-Pyrogenic Viability of Crimean Pine Seeds*. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 6, pp. 417–425. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114818050042>

11. Лесная энциклопедия: в 2 т. / редкол.: Г.И. Воробьев (гл. ред.) и др. М.: Сов. энцикл., 1985. Т. 2. 631 с.

Forest Encyclopedia: in 2 vols. Ed. Board: G.I. Vorob'ev (ed.-in-chief) et al. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1985, vol. 2. 631 p. (In Russ.).

12. Макаров А.В. Технические качества древесины, поврежденной различными видами пожара // Лесотехн. журн. 2011. № 4. С. 14–18.

Makarov A.V. *Technical Properties of Wood Damaged by Different Types of Fires*. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2011, no. 4, pp. 14–18. (In Russ.).

13. Незабудкин Г.К. Искусственное восстановление леса на горяч // Проблемы ликвидации последствий лесных пожаров 1972 г. в Марийской АССР. Йошкар-Ола: Марийск. кн. изд-во, 1976. С. 76–81.

Nezabudkin G.K. *Artificial Reforestation of Burnt-Out Forests. Problemy likvidatsii posledstvij lesnykh pozharov 1972 g. v Marijskoj ASSR*. Yoshkar-Ola, Mari Book Publ. House, 1976, pp. 76–81. (In Russ.).

14. Патент на полезную модель № 11950 U1 РФ, МПК А01В 49/00. Агрегат для подготовки лесной почвы: № 99111026/20: заявл. 21.05.1999: опубл. 16.12.1999 / С.Н. Санников, Д.С. Санников, Б.В. Токарев.

Sannikov S.N., Sannikov D.S., Tokarev B.V. *Forest Soil Preparation Unit*: Patent RF no. 11950 U1, 1999. (In Russ.).

15. Петров А.П. Типы возобновления гарей Волжского лесотранхоза М.А.О.: отдельный оттиск из журнала «МАО», № 2-3, 1934. Йошкар-Ола: Марийск. науч.-исслед. ин-т, 1934. 56 с.

Petrov A.P. *Types of Regeneration of Burnt Areas of the Volga Forestry Enterprise of the Mari Autonomous Oblast*: A Separate Reprint from the “MAO” Journal, no. 2-3, 1934. Yoshkar-Ola, Mari Research Institute, 1934. 56 p. (In Russ.).

16. Санников С.Н., Подшивалов В.А., Санников Д.С. Рекомендации по содействию естественному возобновлению главных пород на горяч в лесах Западной Сибири. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 51 с.

Sannikov S.N., Podshivalov V.A., Sannikov D.S. *Guidelines for Promoting the Natural Regeneration of the Main Species in Burnt-Out Forests of Western Siberia*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. 51 p. (In Russ.).

17. Санников С.Н., Санников Д.С. Система рубок и возобновления сосновых лесов на эколого-генеогеографической основе // Сиб. лесн. журн. 2015. № 6. С. 3–16.

Sannikov S.N., Sannikov D.S. *Felling-System and Regeneration of Pine Forests on Ecological-Genetic-Geographical Basis*. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 6, pp. 3–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150601>

18. Санников С.Н., Санникова Н.С. Экология естественного возобновления сосны под пологом леса. М.: Наука, 1985. 152 с.

Sannikov S.N., Sannikova N.S. *The Ecology of Natural Pine Regeneration under the Forest Canopy*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 152 p. (In Russ.).

19. Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на горяч в лесостепи Западной Сибири // Сиб. лесн. журн. 2019. № 5. С. 22–29.

Sannikova N.S., Sannikov S.N., Kochubei A.A., Petrova I.V. *Natural Pine Regeneration on Burns in Forest-Steppe of Western Siberia*. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2019, no. 5, pp. 22–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20190503>

20. Св. о госрегистрации программы для ЭВМ № 2020665170 РФ. Расчет урожая шишек и семян на лесосеменной плантации сосны обыкновенной: № 2020663985: заявл. 06.11.2020: опубл. 23.11.2020 / Б.В. Раевский.

Raevskij B.V. *Calculation of the Yield of Cones and Seeds on a Scots Pine Seed Plantation*: Certificate of State Registration of a Computer Program no. RF 2020665170, 2020. (In Russ.).

21. Тресцов Б.И. Леса Марийской АССР и ликвидация лесных пожаров 1972 года // Проблемы ликвидации последствий лесных пожаров 1972 г. в Марийской АССР. Йошкар-Ола: Марийск. кн. изд-во, 1976. С. 5–14.

Trestsov B.I. Forests of the Mari ASSR and the Elimination of the 1972 Forest Fires. *Problemy likvidatsii posledstvij lesnykh pozharov 1972 g. v Marijskoj ASSR*. Yoshkar-Ola, Mari Book Publ. House, 1976, pp. 5–14. (In Russ.).

22. Тюкавина О.Н., Гудина А.Г. Теплотворная способность постпирогенной древесины сосны // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 2(38). С. 188–195.

Tyukavina O.N., Gudina A.G. Heating Capability of Postpyrogen Pine Wood. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2020, vol. 10, no. 2(38), pp. 188–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>

23. Шведов Е.И., Васьков С.П., Алексеев И.А. Особенности разрушения древесины, поврежденной огнем // Соврем. проблемы лесовосновения. Воронеж, 1981. С. 75–76.

Shvedov E.I., Vas'kov S.P., Alekseev I.A. Features of the Destruction of Wood Damaged by Fire. *Sovremennye problemy drevesinovedeniya*. Voronezh, 1981, pp. 75–76. (In Russ.).

24. Юницкий А.А. Лесоводственная характеристика марийских горельников. Йошкар-Ола: Маргиз, 1933. 82 с. Отд. оттиск из журн. «Известия ПЛТИ».

Yunitskiy A.A. *Silvicultural Characteristics of the Mari Burnt Forests*. Yoshkar-Ola, Margiz Publ., 1933. 82 p. A Separate Reprint from the Journal “*Izvestiya Povolzhskogo Lesotekhnicheskogo Instituta*”. (In Russ.).

25. Яшинов Л.И. Обзор исследований лесовозобновления на гарях Маробласти, произведенный кафедрой общего лесоводства // Изв. Казанск. ин-та сельск. хоз-ва и лесоводства. 1930. № 1. С. 26–41.

Yashnov L.I. A Review of Reforestation Research in Burnt Areas of the Mari Region, Conducted by the Department of General Forestry. *Izvestiya Kazanskogo instituta sel'skogo khozyajstva i lesovodstva*, 1930, no. 1, pp. 26–41. (In Russ.).

26. Alvarez R., Valbuena L., Calvo L. Effect of High Temperatures on Seed Germination and Seedling Survival in Three Pine Species (*Pinus pinaster*, *P. sylvestris* and *P. nigra*). *International Journal of Wildland Fire*, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 63–70.

<https://doi.org/10.1071/WF06001>

27. Calvo L., Hernández V., Valbuena L., Taboada A. Provenance and Seed Mass Determine Seed Tolerance to High Temperatures Associated to Forest Fires in *Pinus pinaster*. *Annals of Forest Science*, 2016, vol. 73, pp. 381–391. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0527-0>

28. Castoldi E., Molina J.A. Effect of Seed Mass and Number of Cotyledons on Seed Germination after Heat Treatment in *Pinus sylvestris* L. var. *iberica* Svob. *Forest Systems*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 483–489. <https://doi.org/10.5424/fs/2014233-05480>

29. Keenan R.J. Climate Change Impacts and Adaptation in Forest Management: a Review. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, no. 2, pp. 145–167. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0446-5>

30. Ladd P.G., Zhao X., Enright N.J. Fire Regime and Climate Determine Spatial Variation in Level of Serotiny and Population Structure in a Fire-Killed Conifer. *Plant Ecology*, 2022, vol. 223, pp. 849–862. <https://doi.org/10.1007/s11258-022-01243-8>

31. Stephan K., Miller M., Dickinson M.B. First-Order Fire Effects on Herbs and Shrubs: Present Knowledge and Process Modeling Needs. *Fire Ecology*, 2010, vol. 6, pp. 95–114. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0601095>

32. Méndez J., Morales G., Nascimento de L., Otto R., Gallardo A., Fernández-Palacios J.M. Understanding Long-Term Post-Fire Regeneration of a Fire-Resistant Pine Species. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, pp. 609–619. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0482-9>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 634.12+634.17

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-198-211

Вариативность морфолого-биологических характеристик диаспор восточноазиатских представителей трибы *Maleae*, культивируемых в приарктическом регионе

О.П. Лебедева[✉], ассистент; ResearcherID: [G-7967-2019](https://orcid.org/0000-0002-5282-4904),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

Ю.В. Александрова, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAH-4016-2021](https://orcid.org/0000-0002-2802-1124),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-1124>

Н.А. Бабич, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.lebedeva@narfu.ru[✉], yu.aleksandrova@narfu.ru, n.babich@narfu.ru

Поступила в редакцию 22.04.24 / Одобрена после рецензирования 27.06.24 / Принята к печати 29.06.24

Аннотация. Проведен комплексный анализ вариативности морфолого-биологических характеристик диаспор восточноазиатских представителей трибы *Maleae* Small (*Rosaceae*), интродуцированных и культивируемых в условиях приарктического региона на базе дендрологического сада им. И.М. Стратоновича. Исследование охватило такие параметры, как масса 1000 плодов и 1000 семян, доля выхода семян из плодов и доброкачественность семян (жизнеспособность). Коэффициенты вариации изменялись от 8,4 до 37,2 % для массы 1000 плодов, от 10,5 до 41,9 % для массы 1000 семян, от 14,9 до 98,1 % для доли выхода семян из плодов и от 13,7 до 71,0 % для доброкачественности/жизнеспособности. Анализ корреляционных связей выявил сложный характер межпризнаковых взаимоотношений и значительную фенотипическую изменчивость. Так, у яблони сливолистной (*Malus prunifolia* (Willd.)) обнаружена высокая отрицательная корреляция между массой плодов и выходом семян ($r = -0,51$, $p < 0,05$). У яблони ягодной (*M. baccata* (L.) Borkh.) из естественного ареала установлены статистически значимые положительные корреляции между массой 1000 плодов, массой 1000 семян и жизнеспособностью ($r = 0,61-0,73$, $p < 0,05$), тогда как у экземпляров из вторичного ареала эти связи отсутствуют или незначимы. Для образцов яблони ягодной из Пермского ботанического сада установлена устойчивая положительная корреляция между массой семян и их качеством ($r = 0,72-0,84$, $p < 0,05$). В целом масса 1000 плодов и доля выхода семян из плодов демонстрируют преимущественно слабую или отрицательную корреляцию ($r = -0,59-0,38$). Полученные результаты подчеркивают необходимость комплексной и прямой оценки качества семенного материала при выполнении интродукционных и селекционных мероприятий. Практическая значимость исследования заключается в обеспечении эффективного отбора и прогнозирования продуктивности интродуцентов, что способствует формированию устойчивых и продуктивных популяций древесных растений в климатических условиях приарктического региона.

Ключевые слова: интродукция, яблоневые (*Maleae* Small), восточноазиатская флора, вариативность, масса плодов, масса семян, доброкачественность семян

© Лебедева О.П., Александрова Ю.В., Бабич Н.А., 2025



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Благодарности: Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу дендрологического сада им. И.М. Стратоновича за предоставленный доступ к архивным материалам и поддержку в проведении исследования.

Для цитирования: Лебедева О.П., Александрова Ю.В., Бабич Н.А. Вариативность морфолого-биологических характеристик диаспор восточноазиатских представителей трибы *Maleae*, культивируемых в приарктическом регионе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 198–211. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-198-211>

Original article

Variability of Morphological and Biological Characteristics of the Diasporas of East Asian Representatives of the *Maleae* Tribe Cultivated in the Subarctic Region

Olga P. Lebedeva[✉], Assistant; ResearcherID: [G-7967-2019](https://orcid.org/0000-0002-5282-4904),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

Yulia V. Aleksandrova, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAH-4016-2021](https://orcid.org/0000-0002-2802-1124),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-1124>

Nikolay A. Babich, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.lebedeva@narfu.ru[✉], yu.aleksandrova@narfu.ru, n.babich@narfu.ru

Received on April 22, 2024 / Approved after reviewing on June 27, 2024 / Accepted on June 29, 2024

Abstract. A comprehensive analysis of the variability of morphological and biological characteristics of the diasporas of East Asian representatives of the *Maleae* Small (*Rosaceae*) tribe, introduced and cultivated in the conditions of the subarctic region, has been carried out at the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich. The research has covered such parameters as the weight of 1,000 fruits and 1,000 seeds, the percentage of seeds yielding from fruits, and the seed quality (viability). The coefficients of variation have ranged from 8.4 to 37.2 % for the weight of 1,000 fruits, from 10.5 to 41.9 % for the weight of 1,000 seeds, from 14.9 to 98.1 % for the percentage of seed yield from fruits and from 13.7 to 71 % for quality/viability. The analysis of correlations has revealed the complex nature of intertrait relationships and significant phenotypic variability. Thus, the plum-leaved apple tree (*Malus prunifolia* (Willd.)) has shown a high negative correlation between fruit weight and seed yield ($r = -0.51$, $p < 0.05$). In the Siberian crab apple tree (*M. baccata* (L.) Borkh.) from the natural range, statistically significant positive correlations have been established between the weight of 1,000 fruits, the weight of 1,000 seeds and viability ($r = 0.61-0.73$, $p < 0.05$), whereas in specimens from the secondary range these relationships are absent or insignificant. For the crab apple tree samples from the Perm Botanical Garden, a stable positive correlation has been established between seed weight and their quality ($r = 0.72-0.84$, $p < 0.05$). Overall, the weight of 1,000 fruits and the percentage of seed yield from fruits show predominantly weak or negative correlations ($r = -0.59-0.38$). The results obtained emphasize the necessity for a comprehensive and direct assessment of the quality of seed material when performing introduction and breeding activities. The practical significance of this research lies in ensuring effective selection and forecasting of

the productivity of introduced species, which contributes to the formation of stable and productive populations of woody plants in the climatic conditions of the subarctic region.

Keywords: introduction, *Maleae* Small, East Asian flora, variability, fruit weight, seed weight, seed quality

Acknowledgements: The authors express their sincere gratitude to the staff of the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich for providing access to archival materials and support in conducting the research.

For citation: Lebedeva O.P., Aleksandrova Yu.V., Babich N.A. Variability of Morphological and Biological Characteristics of the Diasporas of East Asian Representatives of the *Maleae* Tribe Cultivated in the Subarctic Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 198–211. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-198-211>

Введение

Для интродукции на территорию приарктического региона представляет большой интерес восточноазиатская флора. К указанной флористической области, в соответствии с работами ботаников А.Г.Г. Энглера (1924) и Л. Дильса (1901), относятся территории западного и восточного Тибета, Гималаев, Китая (за исключением южной, тропической части), Кореи, Японии, Сахалина и Курильских островов, Приморского края и южная часть Хабаровского края [6, 7].

Успешность адаптации растений определяется способностью сохранять жизненную форму, присущую виду в естественном ареале, прохождением всех фаз сезонного развития, а также способностью к полноценному самовоспроизводству. Для оценки адаптационного потенциала интродуцируемых пород, успешности размножения и селекции необходимо изучение морфолого-биологических параметров плодов и семян.

Анализ материалов баз данных качественных характеристик диаспор, основанный на многолетних исследованиях в дендрологических и ботанических садах, позволяет выявить закономерности адаптации растений к условиям вторичного ареала. Недостаточная изученность этих аспектов затрудняет прогнозирование успешности интродукции и ограничивает возможности эффективного использования генофонда древесных растений в селекционных, лесовосстановительных и озеленительных программах [9, 11, 14, 15, 19–21, 23, 25]. Систематизация и анализ многолетних архивных данных интродукционных пунктов дают возможность обозначить устойчивые тенденции, определить наиболее перспективные виды и формы, разработать рекомендации по их выращиванию и размножению, что обуславливает актуальность исследования.

В широкий спектр древесных и кустарниковых пород, играющих ключевую роль в структуре и биоразнообразии, входит в т. ч. семейство *Rosaceae* (Розовые), представители которого отличаются высокой экологической пластичностью, ценными декоративными, хозяйственными и адаптивными свойствами, что делает их перспективными для внедрения в новые регионы с различными климатическими условиями [8, 11, 16, 18, 24, 27, 28]. В коллекции интродуцентов дендрологического сада им. И.М. Стратоновича семейство *Rosaceae* является наиболее представленным. Расположение сада в центре г. Архангельска (64°33' с. ш. 40°32' в. д.) позволяет, с одной стороны, создать благоприятные условия для адаптации интродуцентов в суровом климате за счет сниженной амплитуды колебаний температур «теплового острова» и, с другой стороны,

оценить устойчивость видов с точки зрения влияния неблагоприятных урбанистических факторов [4].

Таким образом, для выявления закономерностей адаптации и оценки качества семенного материала древесных интродуцентов, которые в последующем будут использоваться в интродукционных программах, сформулирована цель представленной работы – проведение комплексного анализа вариативности морфолого-биологических параметров плодов и семян интродуцентов трибы *Maleae* Small восточноазиатской флоры на основе многолетних архивных данных дендрологического сада им. И.М. Стратоновича.

Объекты и методы исследования

Для определения акклиматизационных характеристик интродуцируемых растений был проведен анализ архивных данных дендрологического сада им. И.М. Стратоновича, включающих результаты многолетних исследований морфолого-биологических параметров диаспор растений, а также данных, собранных авторами в течение последних 8 лет. Такой комплексный подход позволил не только систематизировать и обобщить информацию, но и дополнить ее актуальными материалами, полученными в современных условиях, что существенно повысило достоверность и полноту представленных результатов.

Отсутствие систематизации массива данных многолетнего мониторинга затрудняет формулирование аргументированных выводов. Для выявления закономерностей и взаимосвязей необходимо проведение статистической обработки и математического анализа материалов.

С целью уточнения видовых характеристик и соотнесения экземпляров растений с новой систематикой использовались различные онлайн-источники актуальной информации о флоре. Среди основных ресурсов – Атлас и онлайн-определитель растений «Плантариум», Международная база данных iNaturalist, база данных «Флора сосудистых растений Центральной России», ресурсы Plants For A Future (PFAF) и World Flora Online (WFO Plant List), содержащие наиболее полный и регулярно обновляемый список современных таксонов растений, поддерживаемый международным сообществом экспертов [3, 5, 17, 22, 26]. Использование этих источников обеспечило комплексный и достоверный подход к уточнению систематической принадлежности исследуемых растений в соответствии с современными ботанической номенклатурой и классификацией.

Морфолого-биологические параметры диаспор – масса 1000 плодов, доля выхода семян из плодов, масса 1000 семян, доброкачественность или жизнеспособность семян – определялись в соответствии с установленными стандартами ГОСТ 13056.8–97, ГОСТ 13056.7–93, ГОСТ 13056.4–67. Масса плодов и семян является важным морфолого-метрическим признаком, отражающим качество и продуктивность диаспор растений.

Методика исследования включает комплекс морфометрических измерений диаспор, морфолого-биологических тестов для выявления качества семян и статистический анализ полученных данных. Для установления степени изменчивости морфолого-биологических параметров нами произведен расчет средних значений, стандартного отклонения и коэффициента вариации (%) для каждого признака. Уровень изменчивости морфологических признаков оценивали по шкале С.А. Мамаева (1972): очень низкий (<7 %); низкий (8–12 %); средний (13–20 %); повышенный (21–30 %); высокий (31–40 %); очень высокий (>40 %) [12].

Для оценки тесноты и направления связи между морфолого-биологическими признаками плодов использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена, который является непараметрическим показателем, позволяющим оценить степень монотонной зависимости между 2 переменными без предположения о нормальном распределении данных. Для качественной оценки тесноты связи использовали шкалу Чеддока: слабая (<0,3); умеренная (0,3–0,5); заметная (0,5–0,7); высокая (0,7–0,9) и очень высокая (>0,9). Все расчеты произведены с помощью программы StatPlus7.

Объектами многолетних наблюдений стали представители восточноазиатской флоры родов яблони (*Malus* Mill.) и боярышника (*Crataegus* L.), трибы *Maleae* Small, семейства Розовые (*Rosaceae* Jussieu). Все растения получены в ходе семенного обмена (табл. 1).

Таблица 1

**Объекты исследования в коллекции дендрологического сада
им. И.М. Стратоновича
The research objects in the collection of the Dendrological Garden
named after I.M. Stratonovich**

Объект исследования	Вид	Место получения семян	Год получения семян, порядок поколения
144a	Боярышник даурский,	Санкт-Петербург, Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 59°58' с. ш. 30°19' в. д.	1938, 1
144b	<i>Crataegus dahurica</i> Koehne ex Schneid	Архангельск, Дендрологический сад им. И.М. Стратоновича, 64°33' с. ш., 40°32' в. д.	1978, 2
433a	Б. зеленомясый, <i>C. chlorosarca</i> Maxim.	Екатеринбург, Дендрологический парк-выставка, 56°50' с. ш. 60°39' в. д.	1940, 1
433b		Архангельск, Дендрологический сад им. И.М. Стратоновича, 64°33' с. ш. 40°32' в. д.	1988, 2
850a	Б. зеленомясый темноплодный, <i>C. chlorosarca</i> var. <i>atrocarpa</i> E. Wolf	Санкт-Петербург, Ботанический сад Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, 59°59' с. ш. 30°20' в. д.	1940, 1
1707a	Б. зеленомясый, <i>C. chlorosarca</i> Maxim.	Санкт-Петербург, Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 59°58' с. ш. 30°19' в. д.	1941, 1
1707b		Архангельск, Дендрологический сад им. И.М. Стратоновича, 64°33' с. ш. 40°32' в. д.	1988, 2
1762	Б. Максимовича, <i>C. maximoviczii</i> Schneider	Санкт-Петербург, Ботанический сад Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, 59°59' с. ш. 30°20' в. д.	1979, 1
1792	Б. Максимовича×зеленомясый, <i>C. maximoviczii</i> × <i>chlorosarca</i>	Происхождение неизвестно. Гибридная форма	–

Окончание табл. 1

Объект исследования	Вид	Место получения семян	Год получения семян, порядок поколения
44b	Яблоня маньчжурская, <i>Malus mandshurica</i> (Maxim.) Kom.	Санкт-Петербург, Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 59°58' с. ш. 30°19' в. д.	1935, 1
44c		Уссурийск, Горнотаежная станция им. В.Л. Комарова, 43°41' с. ш. 132°09' в. д.	1937, 1
202a	Я. сливолистная, <i>M. prunifolia</i> (Willd.)	Санкт-Петербург, Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 59°58' с. ш. 30°19' в. д.	1936, 1
907	Я. сливолистная, ф. № 7, <i>M. prunifolia</i> (Willd.) f. № 7	Пермь, Ботанический сад Пермского университета, 58°00' с. ш. 56°19' в. д.	1939, 1
414	Я. Цуми, <i>M. Zumi</i> (Matsum.) Rehder	Санкт-Петербург, Ботанический сад Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, 59°59' с. ш. 30°20' в. д.	1937, 1
124b	Я. ягодная, <i>M. baccata</i> (L.) Borkh.	Минусинск, ОПХ Минусинское филиал ФИЦ КНЦ Со РАН, 53°42' с. ш. 91°41' в. д.	1934, 1
124b'		Архангельск, Дендрологический сад им. И.М. Стратоновича, 64°33' с. ш. 40°32' в. д.	–
899a	Я. ягодная, ф. № 4, <i>M. baccata</i> (L.) Borkh. f. № 4	Пермь, Ботанический сад Пермского университета, 58°00' с. ш. 56°19' в. д.	1940, 1
899b		Архангельск, Дендрологический сад им. И.М. Стратоновича, 64°33' с. ш. 40°32' в. д.	1957, 2

Результаты исследования и их обсуждение

Достоверность и статистическую значимость полученных данных обеспечивают многолетние измерения морфолого-биологических параметров диаспор древесных растений, включающие средние значения, стандартные отклонения, коэффициенты вариации и доверительный интервал по основным признакам (табл. 2).

Минимальный период наблюдений для исследуемых образцов составляет 15 лет (2-е поколение), а максимальный – 47 лет (1-е поколение). Самые крупные плоды у образцов боярышника даурского и гибридной формы боярышника Максимовича×зеленомясого, а также у яблони сливолистной. Следует отметить, что интродуценты в процессе адаптации характеризуются широкой фенотипической изменчивостью, обусловленной комплексным взаимодействием внутренних морфолого-биологических процессов, свойств почвенного субстрата и множества экологических факторов, которые в совокупности формируют вариативность изучаемых морфолого-биологических признаков.

Высокий коэффициент вариации по показателю доброкачественности семян отмечен у боярышников, в частности у гибридной формы – 71 %. В то же

время у материнского экземпляра боярышника зеленомясого (1707а) доброкачественность более стабильна. Однороднее и стабильнее масса 1000 плодов, что позволяет использовать этот признак для прогнозирования урожайности при выращивании боярышника с целью сбора плодов.

Таблица 2

Статистическая характеристика морфолого-биологических параметров диаспор
The statistical characteristics of morphological and biological parameters
of the diasporas

Объект исследования	Параметр	Среднее	Стандартная ошибка (среднего)	Стандартное отклонение	Асимметрия	Коэффициент вариации, %	Размах значения параметра		Доверительный интервал, граница		Продолжительность наблюдений, лет
							минимум	максимум	нижняя	верхняя	
144а	МП	756,4	23,8	142,5	-0,5	19	366,0	970,3	709,8	802,9	36
	В	11,2	0,5	2,9	3,1	26	7,4	24,8	10,2	12,1	35
	МС	28,3	1,7	6,8	2,5	40	19,0	58,0	25,4	29,5	44
	Д	40,5	2,3	15,5	0,2	38	58,0	70,2	35,9	45,1	44
144b	МП	728,3	38,7	164,0	-0,7	23	349,6	906,3	875,2	250,0	18
	В	10,1	0,5	2,0	-0,5	19	5,6	13,0	11,3	2,4	16
	МС	25,2	1,6	6,8	2,6	27	18,8	49,4	26,4	5,3	18
	Д	30,1	3,0	11,9	0,5	40	15,0	51,0	35,5	14,5	16
433а	МП	456,0	21,4	98,0	0,2	23	289,5	670,0	543,9	143,1	18
	В	15,2	0,9	3,3	-0,3	22	8,6	19,3	18,2	5,0	16
	МС	18,3	1,2	5,1	1,5	24	12,5	29,2	18,8	2,9	18
	Д	24,4	3,1	22,7	0,8	47	11,0	48,0	29,8	12,6	16
850а	МП	510,8	15,4	100,0	2,6	20	337,7	977,2	524,7	59,8	21
	В	19,5	0,6	3,8	-2,0	19	4,0	24,9	21,3	3,3	19
	МС	20,7	0,5	3,1	0,7	15	14,2	31,3	22,4	3,2	22
	Д	34,6	2,1	14,3	-0,2	41	9,0	59,0	45,0	22,6	19
1707а	МП	390,1	10,8	47,1	-0,1	12	318,6	467,4	412,2	60,6	42
	В	17,3	0,6	2,6	-1,3	15	9,9	20,8	18,9	2,2	39
	МС	17,5	0,5	2,4	-0,9	14	10,7	21,0	19,3	3,5	49
	Д	56,0	2,7	14,5	-0,1	26	30,0	86,0	65,0	18,5	47
1707b	МП	417,5	12,3	52,3	0,3	13	340,6	513,2	437,1	54,5	19
	В	16,1	0,6	2,6	-1,0	16	10,0	19,2	17,8	2,8	18
	МС	16,6	0,7	2,8	1,4	17	13,6	23,5	16,5	1,6	29
	Д	24,1	2,4	9,7	0,3	40	7,0	45,0	30,6	13,4	29
1762	МП	575,8	19,6	116,1	-0,4	20	233,0	820,0	637,9	131,4	18
	В	16,7	0,6	3,2	-0,2	19	7,5	24,5	18,7	4,3	16
	МС	25,4	0,9	5,5	0,5	22	14,8	42,6	29,5	8,6	18
	Д	37,3	3,1	17,8	0,4	48	3,8	80,0	47,0	23,0	16
1792	МП	710,1	57,9	163,7	-0,4	23	428,5	917,0	845,2	189,7	35
	В	22,7	1,2	3,5	0,8	15	18,3	30,0	23,7	3,0	33
	МС	33,4	2,1	6,2	0,3	19	24,3	45,0	35,5	6,3	35
	Д	20,0	5,0	14,2	0,7	71	5,0	43,0	38,5	28,0	33
44b	МП	1212,7	84,1	411,9	-0,1	34	570,0	1925,5	1587,5	740,5	24
	В	2,3	0,2	1,1	-0,2	46	0,3	3,7	3,2	1,8	23
	МС	5,9	0,5	2,6	1,2	44	2,4	13,8	7,5	3,4	30
	Д	71,8	5,1	27,4	-0,8	38	8,0	100,0	95,0	39,5	29

Окончание табл. 2

Объект исследования	Параметр	Среднее	Стандартная ошибка (среднего)	Стандартное отклонение	Асимметрия	Коэффициент вариации, %	Размах значения параметра		Доверительный интервал, граница		Продолжительность наблюдений, лет
							минимум	максимум	нижняя	верхняя	
44с	МП	824,7	41,6	186,0	0,6	23	543,0	1300,0	934,6	277,9	20
	В	3,1	0,3	1,1	1,3	36	1,8	6,4	3,7	1,4	19
	МС	4,6	0,3	1,3	0,9	28	2,9	8,0	5,4	1,6	25
	Д	74,3	4,7	23,5	-0,7	32	25,0	100,0	94,0	32,0	25
202а	МП	2272,4	240,3	1127,1	0,1	50	648,7	4074,1	3345,0	2038,3	22
	В	2,1	0,2	0,8	0,8	40	0,8	4,0	2,4	0,8	21
	МС	7,2	0,5	2,6	-0,7	36	2,2	10,9	9,2	3,8	27
	Д	64,3	6,0	28,8	-0,4	45	17,0	100,0	88,8	47,3	23
907	МП	2464,0	151,4	829,4	0,02	34	679,7	4548,5	2812,6	684,5	30
	В	1,6	0,2	0,8	0,4	51	0,5	3,4	2,3	1,3	28
	МС	7,5	0,5	3,0	1,4	39	2,0	19,1	8,7	3,4	40
	Д	61,6	4,6	28,5	-0,5	46	5,9	100,0	82,3	42,4	39
414	МП	535,3	19,7	113,2	-0,2	20	279,5	788,6	641,8	140,7	33
	В	1,3	0,2	1,3	2,1	98	0,1	5,6	1,4	0,9	31
	МС	4,1	0,2	1,3	0,1	32	1,4	6,9	5,0	1,6	38
	Д	67,6	4,6	28,5	-0,8	42	7,0	100,0	91,0	41,0	39
124b	МП	892,3	42,9	196,6	-0,2	22	464,3	1343,9	1005,2	204,6	21
	В	1,7	0,2	0,9	-0,4	54	0,1	3,2	2,1	0,8	19
	МС	5,3	0,3	1,7	0,8	33	1,7	10,6	6,3	2,0	26
	Д	73,2	5,6	27,2	-0,7	37	10,5	100,0	98,3	44,5	24
124b'	МП	1116,2	36,9	202,2	0,1	18	699,2	1546,2	1240,4	295,3	30
	В	1,7	0,2	0,9	0,6	51	0,1	4,3	2,2	1,1	29
	МС	5,1	0,2	1,0	0,8	20	3,7	7,8	5,6	1,2	29
	Д	73,1	3,2	17,4	-0,4	24	38,5	99,0	88,8	26,3	30
899а	МП	1082,7	117,7	485,2	0,6	45	450,2	2061,8	1307,6	533,8	17
	В	1,7	0,3	1,0	0,6	58	0,2	4,0	2,3	1,4	15
	МС	4,1	0,4	1,6	-0,2	40	1,5	6,9	5,6	2,9	18
	Д	62,0	7,9	35,3	-0,5	57	5,0	98,0	94,8	65,4	20
899b	МП	857,8	80,8	378,8	0,8	44	313,3	1715,1	1006,6	407,1	22
	В	1,4	0,2	0,7	0,2	51	0,2	2,7	1,6	0,7	21
	МС	4,2	0,3	1,6	0,3	37	1,7	8,1	5,3	2,3	25
	Д	53,8	7,4	36,4	0	68	5,0	100,0	90,3	70,0	24

Примечание: МП, МС – масса 1000 плодов и 1000 семян соответственно, г; В – доля выхода семян из плодов, %; Д – доброкачественность/жизнеспособность семян, %.

Для видов яблони характерен критически высокий разброс вариаций по всем изученным признакам, особенно по доле выхода семян из плодов – у яблони Цуми коэффициент вариации достигает 98 %. Морфологические признаки с высокими коэффициентами вариации считаются неинформативными при определении видовой принадлежности растений [10]. Таким образом, для представителей родов *Crataegus* L. и *Malus* Mill. выраженной видовой особенностью можно считать изменчивость качественных характеристик диаспор. При этом коэффициенты вариации сохраняются на сопоставимом уровне даже при интродукции одного вида из разных пунктов.

Анализ асимметрии распределения признаков показывает, что она может быть как положительной (сдвигает распределение влево), так и отрицательной (распределение сдвигается влево). В нашем исследовании преобладает умеренная или незначительная асимметрия (до 0,5), однако по выходу и массе 1000 семян наблюдается значительная положительная асимметрия, что свидетельствует о смещении распределения вправо. Это указывает на преобладание в выборке семян с размерами, превышающими среднее значение. Данная тенденция характерна для большинства исследуемых образцов, за исключением материнского образца боярышника зеленомясого, а также образцов яблони сливолистной и ягодной ф. № 4 (899а), для которых отмечено ощутимое смещение распределения влево, что говорит о превалировании мелких семян.

Результаты собственного исследования можно сопоставить с данными других авторов, что позволит более полно оценить феномен изменчивости и варибельности морфолого-биологических признаков у боярышников и яблонь в разных пунктах интродукции.

Во-первых, высокую варибельность морфометрических показателей у боярышников подтверждают сведения из диссертации С.В. Мухаметовой, где отмечается широкий диапазон межвидовой изменчивости длины и ширины семян, а также особенности репродуктивной способности и морфометрических признаков интродуцированных видов *Crataegus* L. в условиях Республики Марий Эл [13]. Эти результаты согласуются с нашими наблюдениями за высокой фенотипической изменчивостью и значительными коэффициентами вариации, особенно по доброкачественности семян у гибридных форм.

Во-вторых, особенности распределения и асимметрии признаков, выявленные в ходе нашего исследования, коррелируют с теоретическими положениями о биологической асимметрии и ее роли в формировании биоразнообразия [2]. Так, умеренная и значительная асимметрия распределения морфолого-биологических признаков, в частности положительная асимметрия по массе и выходу семян, отражают естественные биологические процессы, связанные с адаптацией и отбором в популяциях путем формирования крупных качественных семян.

Кроме того, данные о стабильности массы плодов и ее использовании в качестве прогностического показателя урожайности у боярышника и яблони согласуются с результатами исследований, посвященных влиянию экологических факторов и способов выращивания на продуктивность плодовых культур [1]. Например, отмечается, что масса 1000 плодов является одним из ключевых параметров, отражающих адаптационные возможности и качество семенного материала.

Таким образом, сопоставление с литературными источниками подтверждает, что высокая вариативность морфолого-биологических признаков у представителей родов *Crataegus* L. и *Malus* Mill. – это видовая особенность, обусловленная как генетическими факторами, так и воздействием экологических условий и интродукционных процессов. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к оценке и отбору семенного материала для интродукционных и селекционных программ.

С целью выявления взаимосвязи между массой 1000 плодов, долей выхода семян из плодов, массой 1000 семян и качеством семян (доля доброкачественных и жизнеспособных) проведен корреляционный анализ данных (табл. 3).

Таблица 3

**Сравнительная характеристика корреляционных связей
морфолого-биологических признаков диаспор**
**The comparative characteristics of correlations between morphological
and biological characteristics of the diasporas**

Объект исследования	МП/В	МП/МС	МП/Д	В/МС	В/Д	МС/Д
144a	-0,50	0,14	-0,15	0,27	0,22	0,20
144b	-0,59	0,50	0,18	-0,32	-0,10	0,06
433a	0,33	0,35	0,07	0,52	0,04	0,21
850	-0,27	0,19	0,19	0,07	0,07	0,15
1707a	0,03	0,01	0,08	0,16	0,04	-0,06
1707b	-0,44	0,36	0,18	0,35	-0,24	0,05
1762	-0,36	0,37	0,25	0,01	-0,32	0,27
1792	-0,57	0,40	0,31	0,02	0,17	0,69
44b	-0,17	0,65	0,33	-0,09	0,01	0,18
44c	0,38	0,61	0,73	0,11	0,46	0,45
202a	-0,51	0,62	0,40	-0,58	-0,13	0,28
907	-0,18	0,22	0,46	0,26	0,39	0,32
414	0,19	-0,10	0,19	-0,19	0,61	0,07
124b	0,29	0,16	0,36	0,51	0,59	0,20
124b'	0,17	0,24	-0,21	0,01	0,02	-0,05
899a	0,35	0,39	0,32	0,60	0,71	0,72
899b	0,19	0,63	0,66	0,39	0,41	0,84

Примечание: Корреляции, выделенные жирным шрифтом, значимы на уровне 5 %.

Для анализа тесноты связи между изучаемыми признаками использовали коэффициент корреляции Спирмена, т. к. распределения отличаются от нормального. У боярышников связь есть только для видов Б. даурский, Б. зеленомясый темноплодный, Б. Максимовича. Можно отметить, что масса 1000 плодов заметно отрицательно коррелирует с долей выхода семян у боярышника даурского в 2 поколениях (144a и 144b). Во 2-м поколении появляется закономерная положительная связь с массой 1000 семян. У Б. зеленомясого (433a) корреляция отмечена между долей выхода семян из плодов с массой 1000 семян. Умеренная связь массы 1000 плодов и доли выхода семян из плодов отмечена у Б. Максимовича. У остальных боярышников связь между изучаемыми признаками не зафиксирована.

При исследовании яблони сливолистной выявлена высокая отрицательная корреляционная связь между долей выхода семян из плодов и массой 1000 плодов и 1000 семян, что свидетельствует о тенденции снижения выхода семян с увеличением массы плодов и семян. Для яблони ягодной установлена статистически значимая взаимосвязь между массой плодов, массой семян и доброкачественностью семян у экземпляра, произрастающего в естественном ареале. Для образцов, полученных из вторичного ареала, данные корреляции либо отсутствуют, либо не достигают уровня статистической значимости. Аналогичная ситуация наблюдается у яблони ягодной 2-го поколения (124b').

В случае яблони ягодной (899a, 899b) из Пермского ботанического сада сохраняется устойчивая положительная корреляция между массой семян и их

качеством как в 1-м, так и во 2-м поколении, что указывает на прямую зависимость качества семян от их массы.

В целом масса плодов и выход семян демонстрируют преимущественно слабую или отрицательную корреляцию, что свидетельствует о том, что увеличение массы плодов не является надежным предиктором повышения выхода семян.

С точки зрения селекционной работы с яблоневыми видами масса плодов может рассматриваться как косвенный показатель продуктивности семян и подтверждается наличием положительной корреляции между этими признаками у ряда образцов. Вместе с тем отсутствие статистически значимой корреляции между массой 1000 семян и их качественными характеристиками у большинства исследованных видов подчеркивает необходимость применения в процессе интродукции прямых методов оценки качества семенного материала. Это является важным условием повышения эффективности интродукционных и селекционных исследовательских программ, направленных на улучшение семенного фонда.

Заключение

Проведенный статистический анализ морфолого-биологических признаков диаспор восточноазиатских представителей трибы *Maleae*, культивируемых в приарктическом регионе, выявил значительную фенотипическую изменчивость и сложный характер межпризнаковых корреляций. Установлено, что долю выхода семян из плодов невозможно прогнозировать по массе 1000 плодов, поскольку между этими признаками преобладают слабые или отрицательные корреляции. В то же время доброкачественность семян чаще всего ассоциируется с их массой, особенно у интродуцентов, адаптированных к местным условиям ($r = 0,72-0,84$). Для большинства исследуемых видов статистически значимая корреляция между массой 1000 семян и их качеством отсутствует, что обуславливает необходимость внедрения прямых методов оценки семенного материала в интродукционных и селекционных программах. Полученные результаты имеют важное практическое значение для формирования устойчивых и продуктивных популяций древесных растений в новых климатических условиях и могут служить основой для разработки рекомендаций по отбору и выращиванию перспективных интродуцентов в приарктическом регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреева Н.В., Гурьянова Ю.В., Десятникова Е.В. Влияние абиотических факторов на урожайность и качество плодов яблони // Вестн. Мичуринск. гос. аграр. ун-та. 2012. № 1, ч. 1. С. 43–45.

Andreeva N.V., Guryanova Y.V., Desyatnikova E.V. The Influence of Abiotic Factors on Yield and Quality of Apple Fruit. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Michurinsk State Agrarian University, 2012, no. 1, part 1, pp. 43–45. (In Russ.).

2. Асимметрия взаимовыгодных отношений способствует высокому биоразнообразию // Элементы. 2006. Режим доступа: <https://elementy.ru/> (дата обращения: 18.05.25).

Asymmetry of Mutually Beneficial Relationships Promotes High Biodiversity. *Elements*, 2006. (In Russ.).

3. Атлас и онлайн-определитель растений «Плантариум». Режим доступа: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 18.05.25).
Atlas and Online Plant Identification Guide "Plantarium". (In Russ.).
4. Бабич Н.А., Александрова Ю.В. Интродукция видов рода *Crataegus* L. в дендрологическом саду им. И.М. Стратоновича. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2023. 160 с.
Babich N.A., Aleksandrova Yu.V. *Introduction of Species of the Genus Crataegus L. in the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. 2023. 160 p. (In Russ.).
5. База данных «Флора сосудистых растений Центральной России». М.: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, 2004. Режим доступа: <https://www.impb.ru/eco/> (дата обращения: 18.05.25).
Database "Flora of Vascular Plants of Central Russia". Moscow, Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, 2004. (In Russ.).
6. Воронкова Н.М., Холина А.Б., Журавлев Ю.Н., Сундукова Е.В. Размножение растений российского Дальнего Востока. Владивосток: Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, 2023. 235 с.
Voronkova N.M., Kholina A.B., Zhuravlev Yu.N., Sundukova E.V. *Reproduction of the Russian Far East Plants*. Vladivostok, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Branch), 2023. 235 p. (In Russ.).
<https://doi.org/10.25221/seeds>
7. Вульф Е.В. Историческая география растений. История флоры земного шара. М.; Л.: АН СССР, 1944. 286 с.
Vulf E.V. *Historical Geography of Plants. History of the Earth's Flora*. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1944. 286 p. (In Russ.).
8. Иванова Е.В., Сорокопудов В.Н. Морфологические особенности видов рода *Malus* (L.) Mill. при интродукции в условиях Белгородской области // Современ. проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 630.
Ivanova E.V., Sorokopudov V.N. Morphological Features of Types of Sort *Malus* (L.) Mill. at Introduction in Conditions of the Belgorod Area. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education, 2014, no. 3, p. 630. (In Russ.).
9. Коляда Н.А. Древесные растения флоры Северной Америки в озеленении юга Дальнего Востока России // История и перспективы интродукции растений в России: сб. тез. Всерос. науч. конф. СПб., 2023. С. 31.
Kolyada N.A. Woody Plants of North American Flora in the Greening in the South Far East of Russia. *Istoriya i perspektivy introduktsii rastenij v Rossii*: Collection of Abstracts of the All-Russian Scientific Conference. St. Petersburg, 2023, p. 31. (In Russ.).
10. Конопленко А. Морфология плодов и семян у некоторых представителей рода *Malus* Mill. // Журн. исследований местных и чужеродных растений. 2021. С. 148–155.
Konoplenko A. Morphology of Fruits and Seeds in Some Representatives of the Genus *Malus* Mill. *Zhurnal issledovaniy mestnykh i chuzherodnykh rastenij* = Journal of Native and Alien Plant Studies, 2021, pp. 148–155. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37555/2707-3114.1.2021.247567>
11. Лавриненко Ю.В. Эколого-биологическая характеристика и современное состояние восточноазиатских древесных интродуцентов в условиях Северо-Осетинской наклонной равнины: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь, 2006. 23 с.
Lavrinenko Yu.V. *Ecological and Biological Characteristics and Current Status of East Asian Introduced Trees in the Conditions of the North Ossetian Sloping Plain*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Stavropol, 2006. 23 p. (In Russ.).
12. Мамаев С.А., Горчаковский П.Л. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства сосновых на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.

Мамаев С.А., Gorchakovskij P.L. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (Using the Pine Family in the Urals as an Example)*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 284 p. (In Russ.).

13. Мухаметова С.В. Изменчивость морфометрических и репродуктивных признаков боярышников в условиях Республики Марий Эл: дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2019. 150 с.

Mukhametova S.V. *Variability of Morphometric and Reproductive Traits of Hawthorns in the Republic of Mari El*: Cand. Biol. Sci. Diss. Kazan, 2019. 150 p. (In Russ.).

14. Платонова Е.А., Лантратова А.С., Задоркина Е.А. Восточноазиатские элементы флоры в Ботаническом саду Петрозаводского государственного университета // *Hortus bot.* 2016. Т. 11. Режим доступа: <http://hb.karelia.ru/journal/article.php?id=2964> (дата обращения: 18.09.25).

Platonova E.A., Lantratova A.S., Zadorkina E.A. Species of East Asian Flora in the Botanic Garden of Petrozavodsk State University. *Hortus botanicus*, 2016, vol. 11. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j4.art.2016.2964>

15. Романова А.Б. Генетическая изменчивость древесных интродуцентов в условиях приарктического региона // *Ботан. журн.* 2015. Т. 100, № 3. С. 345–356.

Romanova A.B. Genetic Variability of Woody Introducents in the Conditions of the Near-Arctic Region. *Botanicheskij zhurnal = Botanical Journal*, 2015, vol. 100, no. 3, pp. 345–356. (In Russ.).

16. Романова А.Б. Интродукция древесных растений. Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва, 2018. 86 с.

Romanova A.B. *Introduction of Woody Plants*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University named after Academician M.F. Reshetnev, 2018. 86 p. (In Russ.).

17. Сообщество натуралистов iNaturalist. Режим доступа: <https://www.inaturalist.org/> (дата обращения: 18.05.25).

iNaturalist Naturalists Community. (In Russ.).

18. Ткаченко К.Г., Фирсов Г.А., Васильев Н.П., Волчанская А.В. Особенности формирования и качества плодов видов рода *Malus* Mill., интродуцированных в Ботаническом саду Петра Великого // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Химия. Биология. Фармация*. 2015. № 1. С. 104–109.

Tkachenko K.G., Firsov G.A., Vasiliev N.P., Volchanskaya A.V. Features of Fruit Formation and Quality of Species of the Genus *Malus* Mill. Introduced in the Peter the Great Botanical Garden. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2015, no. 1, pp. 104–109. (In Russ.).

19. Тупик Л.М. Введение в изучение древесных пород: курс лекций для студентов. Минск: БГТУ, 2017.

Tupik L.M. *Introduction to the Study of Woody Species: A Lecture Course for Students*. Minsk, Belarusian State Technological University Publ., 2017. (In Russ.).

20. Gunnarsson B., Knez I., Hedblom M., Ode Sang Å. Effects of Biodiversity and Environment-Related Attitude on Perception of Urban Green Space. *Urban Ecosystems*, 2017, vol. 20, pp. 37–49. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0581-x>

21. Jochner S., Menzel A. Urban Phenological Studies – Past, Present, Future. *Environmental Pollution*, 2015, vol. 203, pp. 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.003>

22. *Plants For A Future*. Available at: <https://plantsforafuture.com/> (accessed 21.05.25).

23. Sheng F., Chen S.-y., Tian J., Li P., Qin X., Wang L., Luo S.-p., Li J. Morphological and ISSR Molecular Markers Reveal Genetic Diversity of Wild Hawthorns (*Crataegus songorica* K.Koch.) in Xinjiang, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, vol. 16, iss. 11, pp. 2482–2495. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61688-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61688-5)

24. Strimbeck G.R., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröder W.P., Kjellsen T.D. Extreme Low Temperature Tolerance in Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, art. no. 884. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00884>

25. Vargas Hernandez J.G., Pallagst K., Hammer P. Urban Green Spaces as a Component of an Ecosystem Functions, Services, Users, Community Involvement, Initiatives and Actions. *International Journal Environmental Sciences & Natural Resources*, 2018, vol. 8, iss. 1, art. no. 555730. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.08.555730>

26. *WFO Plant List: Snapshots of the Taxonomy*. Available at: <https://wfoplantlist.org/> (accessed 18.05.25).

27. Xu Z., Liu Q., Du W., Zhou G., Qin L., Sun Z. Modelling Leaf Phenology of Some Trees with Accumulated Temperature in a Temperate Forest in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 489, art. no. 119085. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119085>

28. Yang Y., Wu Z., Guo L., He H.S., Ling Y., Wang L., Zong S., Na R., Du H., Li M.-H. Effects of Winter Chilling vs. Spring Forcing on the Spring Phenology of Trees in a Cold Region and a Warmer Reference Region. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 725, art. no. 138323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138323>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

