

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

3

2026

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, Скиннгаттеберг)
КОМАРОВА А.М. – отв. секретарь, канд. с.-х. наук (Россия, Архангельск)

Бессчетнова Н.Н., д-р с.-х. 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

3

2026

FOUNDER AND PUBLISHER: NORTHERN (ARCTIC)
FEDERAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

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)

Besschetnova N.N., Doctor of Agriculture, 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)
Sigurdsson 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

- J.M. Cellini, F. Germann, V.L. López, R.L. Arcidiacono, J. Rodriguez Souilla.*
A Height Threshold Redefines Functional Communities: Structural
Transition Between Shrublands and Alpine Forests of *Polylepis*
tarapacana in the Argentine Altiplano 9
- Р.Н. Матвеева, А.М. Пастухова, Н.А. Шенмайер, Е.А. Громов, А.В. Ман-*
тулина. Показатели роста разновозрастных географических куль-
тур *Pinus sibirica* Du Tour 30
- И.В. Предеина, А.Н. Гавриленко, С.В. Залесов.* Ресурсы кедрового ореха в
Ханты-Мансийском автономном округе 41
- А.М. Постников, А.Б. Егоров, А.А. Бубнов, Л.Н. Павлюченкова.* Биоло-
гическая и экономическая эффективность применения гербицидов
способом инъекции при проведении уходов за молодняками..... 53
- А.Д. Маркова, О.М. Шабалина, И.Н. Безкоровайная.* Структура расти-
тельности благоустроенной части экопарка Гремячая Грива (г. Крас-
ноярск) 68
- Г.Э. Рего, О.И. Григорьева, И.В. Григорьев, В.П. Друзьянова, Е.Ю. Мат-*
виенко. Математическая модель отбора деревьев с учетом заданной
абсолютной полноты насаждения при проведении рубок ухода 82
- С.К. Мамедова, А.А. Вайс, Г.С. Варакин, А.И. Мельник.* Формирование
травяно-кустарничкового яруса в нарушенных уссурийским поли-
графом насаждениях подтаежно-лесостепного района 95

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

- В.А. Уткин, П.Н. Кобзев.* Совершенствование конструкции деревобетон-
ных мостов с применением клееной древесины..... 110
- А.С. Королев, Е.С. Шарапов, А.О. Быков, П.Г. Тимаков.* Оценка физи-
ко-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) ме-
тодами ударного импульса и упругого отскока..... 122

- С.Д. Пименов, А.И. Сизов, И.В. Кручина-Богданов, А.А. Добровольский, С.Р. Мамбетова. Биорефайнинг древесного сырья: получение биоадгезива на основе гемицеллюлоз..... 133

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

- В.В. Гораздова, А.А. Кулебякина, Е.В. Дернова, Д.А. Дулькин. Оценка эффективности использования Na-КМЦ в технологическом потоке влагопрочной бумаги..... 150

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- Е.В. Авдеева, Н.В. Цыганкова. Устойчивость кустарников на объектах озеленения г. Красноярска по показателю жизненного состояния 163
- А.Н. Соболев, П.А. Феклистов, В.И. Мелехов, И.Н. Болотов, О.С. Барзут. Световой режим под пологом березняка черничного 175
- И.А. Гончарова, Л.Н. Скрипальщикова, А.П. Барченков. Динамика структуры травяно-кустарничкового яруса березовых насаждений Красноярской лесостепи 183
- О.В. Грибачева. Полезащитные лесополосы *Quercus robur* L. и *Fraxinus excelsior* L. в степной зоне 194
- Э.А. Генрих, Е.А. Беляева, Д.В. Лешуков. Формовое разнообразие ели в северной подзоне тайги Архангельской области..... 205



CONTENTS

FORESTRY

J.M. Cellini, F. Germann, V.L. López, R.L. Arcidiacono, J. Rodriguez Souilla. A Height Threshold Redefines Functional Communities: Structural Transition Between Shrublands and Alpine Forests of *Polylepis tarapacana* in the Argentine Altiplano 9

R.N. Matveeva, A.M. Pastuhova, N.A. Schenmaier, E.A. Gromov, A.V. Mantulina. Growth Traits of Mixed-Age Provenance Trial Plantations of *Pinus sibirica* Du Tour 30

I.V. Predeina, A.N. Gavrilenko, S.V. Zalesov. The Pine Nut Resources in the Khanty-Mansi Autonomous Area 41

A.M. Postnikov, A.B. Egorov, A.A. Bubnov, L.N. Pavluchenkova. Biological and Commercial Efficiency of Applying Herbicides via Injection During Young Growth Tending..... 53

A.D. Markova, O.M. Shabalina, I.N. Bezkorovaynaya. Vegetation Structure of the Landscaped Area of the Gremyachaya Griva Ecopark (Krasnoyarsk) 68

G.E. Rego, O.I. Grigoreva, I.V. Grigorev, V.P. Druzyanova, E.Yu. Matvienko. A Mathematical Model for Tree Selection That Accounts for a Specified Absolute Stand Density During Improvement Thinning Operations 82

S.K. Mamedova, A.A. Vais, G.S. Varaksin, A.I. Melnik. Herb and Subshrub Layers Development Among Forest Plantations Disturbed by the Four-Eyed Fir Bark Beetle in the Subtaiga Forest-Steppe Zone 95

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

V.A. Utkin, P.N. Kobzev. Design Improvement of Composite Timber-Concrete Bridges Using Glued Laminated Timber 110

A.S. Korolev, E.S. Sharapov, A.O. Bykov, P.G. Timakov. Evaluation of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Mechanical and Physical Properties Using the Impact Pulse and Elastic Rebound Methods 122

-
- S.D. Pimenov, A.I. Sizov, I.V. Kruchina-Bogdanov, A.A. Dobrovolsky, S.R. Mambetova.* Biorefining of Wood Feedstock: Production of a Hemicellulose-Based Bioadhesive 133

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

- V.V. Gorazdova, A.A. Kulebyakina, E.V. Dernova, D.A. Dulkan.* Performance Evaluation of Na-CMC in the Wet-Strength Paper Process Flow 150

BRIFF REPORTS AND EXPERIENCE EXCHANGE

- E.V. Avdeeva, N.V. Tsygankova.* Tolerance of Shrubs at the Krasnoyarsk's Landscaping Facilities in Terms of Their Vitality Index 163
- A.N. Sobolev, P.A. Feklistov, V.I. Melekhov, I.N. Bolotov, O.S. Barzut.* Light Regime Under the Canopy of a Birch-Blueberry Forest 175
- I.A. Goncharova, L.N. Skripal'shchikova, A.P. Barchenkov.* Dynamics of the Grass and Shrub Layer Structure in Birch Stands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe 183
- O.V. Gribacheva.* Protective Forest Belts of *Quercus robur* L. and *Fraxinus excelsior* L. in the Steppe Zone 194
- E.A. Genrikh, E.A. Belyaeva, D.V. Leshukov.* Spruce Morphological Diversity in the Northern Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region 205
-



Original article

УДК 630

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-9-29

A Height Threshold Redefines Functional Communities: Structural Transition Between Shrublands and Alpine Forests of *Polylepis tarapacana* in the Argentine Altiplano

Juan Manuel Cellini¹, Doctor of Natural Sciences, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [PCU-0716-2025](https://orcid.org/0000-0002-7870-5751), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7870-5751>

Federica Germann¹, Postgraduate Student, Research Scientist;

ResearcherID: [PDW-2782-2025](https://orcid.org/0009-0005-5837-2266), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5837-2266>

Victoria Lien López^{1,2}, Doctor of Agriculture and Forestry, Postdoctoral Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [PDW-2312-2025](https://orcid.org/0000-0002-0035-7435),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0035-7435>

Rocio Lara Arcidiacono³, Postgraduate Student, Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0807-7152>

Julián Rodríguez Souilla³, Doctor of Agriculture and Forestry Sciences, Postdoctoral Research Scientist;

ResearcherID: [PDW-2127-2025](https://orcid.org/0000-0001-8772-2310),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8772-2310>

¹Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP), Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD), Diagonal 113 # 469, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina, 1900; JMC@agro.unlp.edu.ar, Federica.Germann@agro.unlp.edu.ar, Victoria.Lopez@agro.unlp.edu.ar

²Centro Científico Tecnológico La Plata (CCT), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Calle 8 # 1467, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina, 1900; Victoria.Lopez@agro.unlp.edu.ar

³Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET), Bernardo Houssay # 200, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina, 9410; RocioArcidiacono@conicet.gov.ar, J.Rodriguez@conicet.gov.ar

Received on December 18, 2025 / Approved after reviewing on February 12, 2026 / Accepted on February 15, 2026

Abstract. The high-Andean forests of *Polylepis tarapacana* at the global treeline form a structural continuum between shrublands and forests, complicating their functional classification. This study evaluates whether a discrete height threshold – Mean Dominant Height ≥ 2 m – defines a genuine ecological transition between these formations in the Argentine Altiplano, aiming to validate this threshold, identify its predictors, and assess its consequences for the ground-layer vegetation. Ninety-six forest inventory plots were analyzed and classified as “Forest” (mean dominant height ≥ 2 m) or “Shrubland” (mean dominant height < 2 m). Structural variables (basal area, density, diameter distribution), proportions of life forms (arborescent, dwarf tree, shrub, *brousse tigrée*), allometric parameters, and ground cover composition were compared. Analyses included Principal Component



Analysis, non-parametric tests, logistic regression models, and indicator species analysis. The 2 m threshold discriminated two clearly distinct communities. “Forests” (19.4 % of plots) exhibited greater basal area (2.8 times higher), diameter diversity, structural complexity, and a higher proportion of arborescent life forms. They showed a more efficient height-diameter relationship and a distinctive ground cover with greater cover of cushion plants and specialist indicator species (e.g., *Senecio nutans*). “Shrublands” were dominated by juvenile individuals, shrubby forms, and heliophytic perennial shrubs. The probability of achieving a forest state was positively predicted by the presence of arborescent forms and a favorable substrate (Favorable Substrate Index). The mean dominant height ≥ 2 m threshold constitutes a quantifiable ecological tipping point separating distinct successional and functional states in *Polylepis tarapacana*. This structural criterion synthesizes profound changes in community architecture, microclimate, and associated biotic assemblages. The findings provide a robust framework for the operational classification, monitoring, and priority conservation of these vulnerable alpine ecosystems, moving beyond purely morphological definitions towards a characterization based on ecological functionality.

Keywords: *Polylepis tarapacana*, treeline, structural threshold, mean dominant height, high-Andean forests, functional classification, alpine ecosystems, Argentine Altiplano

Acknowledgments: We thank those researchers who, for years, questioned whether *Polylepis tarapacana* formations could be called forests, preferring terms like “forestlands” or “shrublands”. Their persistent skepticism challenged us to write this. Thanks to them, we now have clear, height-based criteria aligned with the UN definition. We are grateful for their opposition; it pushed us to do better. We also thank Argentina’s public, free, and co-governed university system. Despite devastating defunding and difficult times, we published this work through collective effort. This paper proves that public university researchers do not give up.

For citation: Cellini J.M., Germann F., López V.L., Arcidiacono R.L., Rodriguez Souilla J. A Height Threshold Redefines Functional Communities: Structural Transition Between Shrublands and Alpine Forests of *Polylepis tarapacana* in the Argentine Altiplano. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 9–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-9-29>

Научная статья

Порог высоты как структурный переход между кустарниковыми зарослями и альпийскими лесами *Polylepis tarapacana* на плато Альтиплано в Аргентине

Х.М. Селини¹, д-р естеств. наук, доц.; ResearcherID: [PCU-0716-2025](https://orcid.org/0000-0002-7870-5751),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7870-5751>

Ф. Германн[✉], аспирант, науч. сотр.; ResearcherID: [PDW-2782-2025](https://orcid.org/0009-0005-5837-2266),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5837-2266>

В.Л. Лопес^{1,2}, д-р с.-х. и лесохозяйств. наук, ученый-исследователь, доц.;
ResearcherID: [PDW-2312-2025](https://orcid.org/0000-0002-0035-7435), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0035-7435>

Р.Л. Арсидьяконо³, аспирант, науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0807-7152>

Х. Родригес Суилья³, д-р с.-х. и лесохозяйств. наук, ученый-исследователь;
ResearcherID: [PDW-2127-2025](https://orcid.org/0000-0001-8772-2310), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8772-2310>

¹Национальный университет Ла-Платы, Факультет аграрных и лесных наук, Лаборатория исследований древесины (LIMAD), диагональ 113 № 469, г. Ла-Плата, пров. Буэнос-



Айрес, Аргентина, 1900; JMC@agro.unlp.edu.ar, Federica.Germann@agro.unlp.edu.ar[✉], Victoria.Lopez@agro.unlp.edu.ar

²Научно-технологический центр г. Ла-Плата (CCT), Национальный совет по научным и техническим исследованиям (CONICET), улица 8 № 1467, г. Ла-Плата, пров. Буэнос-Айрес, Аргентина, 1900; Victoria.Lopez@agro.unlp.edu.ar

³Центр научных исследований Южного полушария (CADIC-CONICET), Бернардо Хоус-сай № 200, г. Ушуайя, Терра дель Фуего, Аргентина, 9410; RocioArcidiacono@conicet.gov.ar, J.Rodriguez@conicet.gov.ar

Поступила в редакцию 18.12.25 / Одобрена после рецензирования 12.02.26 / Принята к печати 15.02.26

Аннотация. Высокогорные леса *Polylepis tarapacana* в Андах образуют структурный переход по верхней границе своего распространения от кустарниковых формаций до сомкнутых древостоев, что затрудняет их однозначную функциональную классификацию. Цель работы заключалась в оценке дискретного порога по средней доминантной высоте (≥ 2 м) как критерия, определяющего экологический переход между кустарниковыми и лесными сообществами *P. tarapacana* на плато Альтиплано в Аргентине, для его валидации, выявления предикторов и оценки влияния на состав подлеска. На основе данных сплошной таксации 96 пробных площадей (от 25 до 4000 м²) насаждения распределены по следующим типам: лес (средняя доминантная высота ≥ 2 м) и кустарниковые заросли (средняя доминантная высота < 2 м). Проведен анализ и сравнение структурных показателей (средний диаметр у шейки корня, площадь сечения, густота, распределение по ступеням толщины), состава жизненных форм (древовидная, стланиковая, кустарниковая, тигровый буш *brousse tigrée*), аллометрических показателей (высоты и диаметра) и состава живого напочвенного покрова. Использованы метод главных компонент (PCA), непараметрические критерии (Манна–Уитни, Уилкоксона), логистическая регрессия и анализ индикаторных видов (IndVal). Установленный порог средней доминантной высоты 2 м позволяет четко разграничить 2 типа сообществ с различной структурой, таксационными показателями и флористическим составом. Для леса характерны большая площадь сечения (в 2,8 раза выше), разнообразие диаметров и структурная сложность, а также большая доля древовидных жизненных форм. Аллометрическая модель показывает более эффективное соотношение высоты и диаметра. Напочвенный покров лесов имеет в составе значительную долю подушкообразных растений, и встречаются виды-индикаторы, строго связанные с этим типом (например, *Senecio nutans*). В кустарниковых зарослях доминируют ювенильные особи и кустарниковые жизненные формы, а в подлеске – многолетние светолюбивые кустарники. Вероятность отнесения участка к лесу прямо связана с наличием древовидных форм и благоприятными условиями субстрата (высокий индекс его пригодности). Пороговая средняя доминантная высота является количественно определяемым и экологически значимым показателем, разделяющим различные сукцессионные стадии и функциональные состояния в сообществах *P. tarapacana*. Этот структурный показатель интегрирует кардинальные изменения в пространственной структуре древостоя, микроклимате и ассоциированных биоценозах. Полученные результаты формируют научную основу для классификации, мониторинга и приоритетной охраны этих уязвимых высокогорных экосистем, предлагая переход от морфологических описаний к критериям, отражающим экологическую функциональность.

Ключевые слова: *Polylepis tarapacana*, верхняя граница леса, структурный переход, средняя доминантная высота, высокогорные леса Анд, функциональная классификация, альпийские экосистемы, плато Альтиплано в Аргентине

Благодарности: Благодарим исследователей, которые на протяжении многих лет ставили под сомнение правомерность использования термина «лес» для обозначения сообществ *Polylepis tarapacana*, отдавая предпочтение таким терминам, как «лесные зарос-

ли» или «кустарниковые заросли». Их стойкий скептицизм подтолкнул нас к написанию данной работы, а их критическое отношение к вопросу способствовало улучшению ее качества. Также выражаем признательность системе государственных, бесплатных и совместно управляемых университетов Аргентины. Мы смогли опубликовать эту работу за счет слаженной и плодотворной работы нашего коллектива, несмотря на сокращение финансирования и непростые времена. Публикация данного исследования доказывает, что ученые из государственных университетов не бросают дело на полпути.

Для цитирования: Селини Х.М., Германн Ф., Лопес В.Л., Арсидьяконо Р.Л., Родригес Суилья Х. Порог высоты как структурный переход между кустарниковыми зарослями и альпийскими лесами *Polylepis tarapacana* на плато Альтиплано в Аргентине // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 9–29. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-9-29>

Introduction

Alpine and treeline ecosystems are among the most sensitive to climate change, serving as key indicators of environmental shifts [30] – a concept also widely studied in the boreal and mountain ecosystems of Eurasia [21]. In the Andes, trees and shrubs of the genus *Polylepis* reach some of the highest elevations on Earth. Notably, *Polylepis tarapacana* Phil. forms woodlands up to 5200 m above sea level [3]. These ecosystems are subjected not only to extreme conditions of temperature, radiation, and water availability [11, 23] but also exhibit high phenotypic plasticity. This plasticity is expressed as a continuum of life forms, ranging from multi-stemmed shrubs to single-stemmed trees [26]. Such structural variability complicates the ecological distinction between what constitutes a “Shrubland” and a “Forest” – a critical distinction for understanding ecosystem service provision, carbon storage, and the conservation of associated biodiversity in these vulnerable environments.

The definition of “forest” is not universal; it varies across institutional and scientific frameworks. In Argentina, for example, Native Forest Law 26331/07 defines native forests in terms of natural forest ecosystems predominantly composed of mature native tree species but does not establish explicit minimum height thresholds [32]. At the international level, instruments such as the Kyoto Protocol and the UNFCCC [45] define a forest as an area with a minimum canopy cover of 10–30 % and trees capable of reaching heights of more than 2–5 m, thereby recognizing the importance of quantifiable structural thresholds for classification and monitoring. This definitional flexibility highlights the need for contextualized criteria that capture the true ecological functionality of woody formations, especially in extreme environments like the Altiplano. The literature on native forests in Argentina has emphasized the ambiguity of current definitions and their implications for management and monitoring [32]. It has been noted that definitions based solely on structural aspects, such as cover and height, may overlook functional and landscape components, which is particularly relevant in high-mountain ecosystems where connectivity and microclimate are critical determinants.

Previous studies in the region have laid the groundwork for understanding the determinants of *P. tarapacana* structure. On one hand, López et al. [26] characterized the diversity of life forms (arborescent, dwarf tree, shrub, and *brousse tigrée*) and demonstrated that their distribution responds to topographic and climatic gradi-

ents. On the other hand, López et al. [30] evaluated the influence of topography and substrate on structural variables such as dominant height, canopy cover, and density, revealing that the more developed communities are associated with higher elevations and mixed substrates of bare soil and vegetation. However, structure has not been addressed as a continuum, nor has it been explored whether discrete thresholds exist that separate communities with differentiated ecological functioning.

Defining when an assemblage of *P. tarapacana* individuals constitutes a functional forest, beyond its morphological designation, has profound ecological and management implications. A height threshold, such as a Mean Dominant Height (MDH) ≥ 2 m, could act as a tipping point from which changes in canopy architecture substantially modify the microclimate, soil properties, and associated biotic assemblages [16, 20]. This approach aligns with proposals highlighting the need to include patch size, connectivity, and landscape composition thresholds in forest definitions to capture their integral ecological functionality [32]. The marked preference of *P. tarapacana* for specific elevations [29] and its association with moisture-retaining rocky microsites [28] suggest that local abiotic conditions are fundamental for achieving a forest structure. Key questions thus arise: (i) Does this threshold discriminate between communities with significant differences in life-form composition, population structure, and ground cover assemblage attributes? (ii) Which abiotic and biotic factors predict the likelihood of a site reaching this “forest” state? (iii) Is there a specialized ground-layer assemblage associated with this structural threshold?

The objective of this study is to assess whether the MDH (≥ 2 m) threshold defines a transition in the structure, diversity, and environment of *P. tarapacana* communities. This assessment aims to discriminate between shrub and forest formations with distinct environmental, structural, and compositional properties at the treeline elevation of the Argentine Altiplano, with the purpose of: 1) validating the structural threshold, 2) identifying its predictors, and 3) evaluating its ecological consequences for the associated plant assemblage.

This study had three specific objectives. First, to validate whether classification based on the MDH > 2 m threshold captures differences in structure and life forms beyond previously described topographic gradients (H1: Forest plots (MDH ≥ 2 m) will exhibit a higher proportion of arborescent (Ar) life forms, greater basal area, different diameter distribution, and greater vertical complexity than shrubland plots (MDH < 2 m), independently of elevation and slope). Second, to identify the abiotic (topography, substrate) and biotic (life form composition) factors predicting the likelihood of a site reaching the forest state (H2: This probability will be positively determined by a higher proportion of Ar and dwarf tree (Dt) life forms and a favorable substrate (high Favorable Substrate Index – FSI), with a secondary negative effect of slope). Third, to evaluate the ecological consequences of the structural threshold on the ground-layer vegetation (H3: Forest sites will host a ground layer with greater species richness, a distinctive floristic composition (higher proportion of perennial herbs and cushion plants), and lower grass cover compared to shrublands, where heliophytic perennial shrubs will dominate).

Research Objects and Methods

Study Area and Data. The study was conducted in the Argentine Altiplano (22°04'–23°40' S; 66°46'–65°49' W), the southern distribution limit of *P. tarapacana*.

We worked with an integrated dataset of 96 complete forest inventory plots (25–4000 m²) from previous studies [30]. In each plot, we measured the diameter at the base (DAB, cm), defined as the stem diameter measured at 10 cm above ground level, following standard protocols for shrub and multi-stemmed tree measurements in high-Andean ecosystems [30], total height (H, m), and classified each individual into a life form following the typology of López et al. [26]: Ar, Dt, shrub (Sh), or *brousse tigrée* (Bt). Topographic and substrate variables were also recorded: elevation (m a.s.l.) and slope (degrees). Substrate cover was quantified in 100 subplots of 1 m², categorizing: 1) Monocotyledons (MONO) – species of the Poaceae family; 2) Dicotyledons (DICO) – dicotyledons ground-layer vegetation; 3) Litter (L) – surface plant residues; 4) Bare Soil (BS) – open soil, organic or mineral, earthy or sandy surfaces not covered by vegetation; 5) Rock (R) – bedrock outcrops fixed to the soil; 6) Scree (S) – loose stones of various sizes deposited on the surface or semi-fixed; grain size always larger than the sand fraction; 7) Rock Edge (RE) – influence zone between rocks and the surrounding soil or scree; and 8) Soil under Rock Protection (SRP) – area shaded by overlying rocks. This resulted in two categories of microsites characterized by plant types and six by substrate types [28].

Ground-layer vegetation data (including herbaceous plants, cushion plants, and low shrubs) were obtained from species and functional group cover, using the Ramsay & Oxley [34] classification adapted for GLORIA-Andes [5]: perennial shrubs, cushion plants, perennial herbs, annual herbs, and perennial subshrubs. Within each plot, a 50 m transect was established, and vegetation cover was recorded using the point-intercept method at 1 m intervals (50 points per transect) [27]. This procedure was repeated across all 96 plots to ensure consistent sampling of ground-layer vegetation.

Classification and Derived Variables. The main response variable was created using a discrete structural threshold, classifying plots as “Forest” (MDH $\geq$ 2 m) and “Shrubland” (MDH < 2 m). The following variables were calculated: 1) DAB: Mean DAB (cm) of individuals per plot; 2) GiniDAB: Gini index for inequality [15] in diameter distribution (0 = all trees have the same DAB; 1 = maximum inequality); 3) ShannonDAB: Shannon index of diametric diversity [37], based on 5 cm classes (0 = all trees in a single class; high values = greater size/age diversity); 4) Density (DEN, stems/ha); 5) Basal area (BA, m²/ha), measured from the DAB of all live individuals $\geq$ 0.05 m tall [30]; 6) GiniBA: Gini index for inequality in BA distribution (0–1), expressing BA inequality among individuals; high values indicate dominance by few large trees; 7) HT: Mean height (m) of individuals; 8) MDH (m) as the average H of the three tallest individuals; 9) DAB/HT index: Diameter-to-height relationship, calculated using Spearman’s correlation coefficient [42]; values close to 1 indicate a strong positive relationship (greater diameter with greater height); 10) Canopy cover (CC, %); 11) ShCoverI (%): Proportion of individuals with H < 1.3 m relative to the total; 12) SCI: Structural Complexity Index calculated as the ShannonDAB combined with total BA [43]; 13) FSI: Index calculated as the sum of RE and SRP; 14) Life Form Diversity Index: Simpson’s index [39] calculated from the proportions of Ar, Dt, Sh, and Bt.

Statistical Analyses. To validate the 2 m MDH threshold separating forests and shrublands, we used non-parametric t-tests (Wilcoxon-Mann-Whitney) [31] and ANOVAs to compare structural variables (BA, DEN, cover) and life form proportions between the two types.

A Principal Component Analysis (PCA) with variable scaling was performed using seven variables previously identified to differentiate *Polylepis* communities [30]: ShCoverI, BA, CC, FSI, elevation, slope, and DEN. MDH was excluded from the PCA as it was the classification criterion. The significance of group separation in multivariate space was tested using Wilks' MANOVA [47], complemented with independent t-tests for the first two principal components (PC1 and PC2).

The population structure of *P. tarapacana* across 96 plots (77 shrublands, 19 forests) was analyzed using the diameter-height allometric relationship (DAB-H) modeled with a power function ($H = a \times \text{DAB}^b$). Separate models were fitted for each community and compared using parametric bootstrap (500 iterations) [8], likelihood ratio tests (F-test), and 95 % delta-method confidence intervals [33]. Goodness-of-fit was assessed with R^2 , mean squared error (MSE), and mean absolute error (MAE). The Vertical Stratification Index (height_stratification) was calculated as the standard deviation of normalized heights within each plot, expressing the vertical heterogeneity of the community. Community types were compared using a non-parametric median difference test. Diameter class distribution was analyzed by grouping DAB into 5 cm intervals (0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, >25 cm). This class width was selected because it is standard in high-Andean forest inventories [30], allows for detection of fine-scale structural differences between shrublands and forests, and minimizes the occurrence of empty classes in these low-density populations. Proportions per class were compared using chi-square tests with Yates' correction [48]. Diametric diversity was quantified with the ShannonDAB index, which measures heterogeneity considering both richness and evenness of classes. Diametric inequality was assessed with the Gini index, ranging from 0 (perfect equality) to 1 (maximum inequality). Both metrics were analyzed multivariately using MANOVA.

Simpson's Index as a Measure of Life Form Diversity. To assess Life Form Diversity Index within each plot, Simpson's index (1-D) was calculated – a diversity measure considering both richness (number of forms present) and evenness (proportional distribution of individuals among forms). The index was calculated for each plot, with values ranging from 0 (maximum dominance, a single form present) to ~0.75 (maximum evenness among the four forms). The average diversity per community type (forest vs. shrubland) was compared using the Wilcoxon test, given the non-normality of the data.

Analysis of the Ground-Layer Vegetation Community. Cover by ground-layer functional growth forms – perennial shrubs (P Sh), cushion plants (C P), perennial herbs (P H), annual herbs (A H), and perennial subshrubs (P Ss) – was compared between community types using Wilcoxon rank-sum tests [46], as data did not meet assumptions of normality (Shapiro-Wilk) [38] or homogeneity of variances [25]. Differences were considered significant at $p < 0.05$. For functional groups showing significant differences, an Indicator Species Analysis was performed using the Indicator Value (IndVal) index [7]. The statistical significance of the IndVal for each species was evaluated with 14,999 permutations (significance level $\alpha = 0.05$). To focus on the most ecologically relevant associations, only species with an IndVal > 0.35 were considered indicators. This threshold corresponds to a 'moderate' association level according to the classic interpretation of the index [7] and was adopted to identify the most robust indicators.

Software: All analyses were performed in R v4.3+, using the vegan, FactoMineR, indicpecies, ggplot2, lme4, boot, and MuMIn packages.

Results and Discussion

The application of the MDH (≥ 2 m) threshold classified 19 plots (19.4 %) as “Forest” and 79 plots (80.6 %) as “Shrubland”, evidencing the low relative frequency of developed woodland formations in the Altiplano.

Forests and Shrublands Along an Environmental-Structural Gradient. PCA explained 61.1 % of the total variability (PC1: 31.8 %, PC2: 29.3 %). Figure 1 shows a separation between the two community types along PC2. Forests clustered at positive PC2 values, strongly associated with greater BA (loading: 0.741), elevation (0.719), and a higher FSI (0.330). Shrublands concentrated at negative PC2 values, characterized by a high proportion of juveniles (ShCoverI: loading -0.840). MANOVA confirmed significant differences between communities ($F = 50.16$, $p < 0.001$), with differences along PC2 being the most marked ($t = -9.574$, $p < 0.001$), while no significant differences were found along PC1 (associated with DEN and cover) ($t = 0.771$, $p = 0.446$). This indicates that although both types can present similar densities, they are fundamentally separated by attributes related to structural maturity and environmental conditions. The PCA clearly separated forest and shrubland communities along PC2, which is associated with variables related to structural development (BA, elevation, FSI) and juvenile abundance (ShCoverI). Forests are positioned in the positive PC2 space, indicating higher BA, elevation, and favorable substrate, while shrublands cluster in the negative PC2 space, characterized by a higher proportion of juvenile individuals.

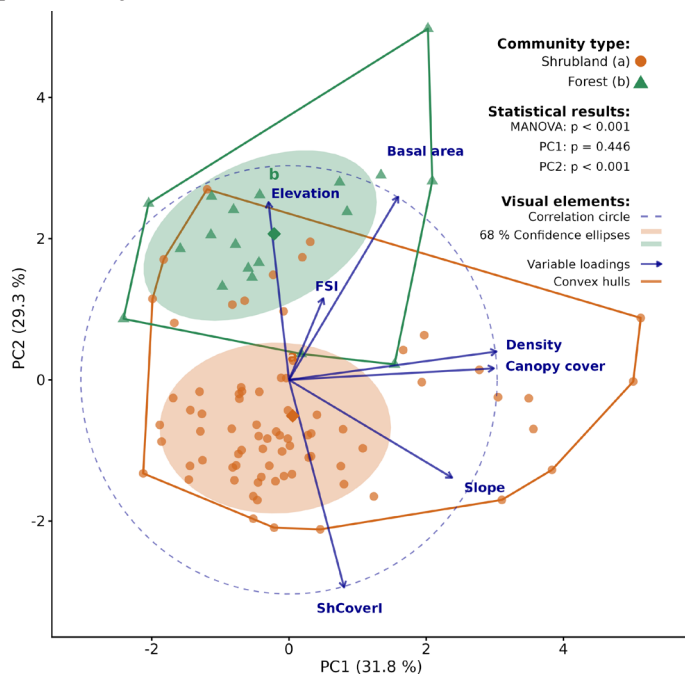


Fig. 1. PCA ordination of forest (MDH ≥ 2 m) and shrubland (MDH < 2 m) communities based on seven structural and environmental variables. Arrows represent variable loadings on PC1 (31.8 % of variance) and PC2 (29.3 % of variance): basal area (m^2/ha); Elevation (m a.s.l.); FSI – Favorable Substrate Index; ShCoverI – shrub cover index; Canopy cover (%); Slope ($^\circ$); Density (ind/ha). Points represent individual plots, ellipses show 95 % confidence intervals around group centroids. The separation along PC2 reflects differences in structural maturity and substrate quality

Univariate validation confirmed the PCA patterns. The application of the $MDH \geq 2$ m threshold clearly differentiated two community types. Shrublands showed higher DEN (1349.1 ± 988.0 stems/ha vs. lower values in forests; $p < 0.05$), dominated by small-sized individuals (ShCoverI significantly greater in shrublands, $p < 0.001$), representing on average more than 50 % of individuals, while in forests this proportion was reduced to less than 30 %. Forests presented significantly higher values in all structure and development variables (Table 1), except for GiniBA, which showed $p = 0.072$. Specifically, forests had a total BA 2.8 times greater, higher mean diameters (DAB) and heights, and greater diametric diversity (ShannonDAB). GiniDAB was higher in Forests, reflecting a more heterogeneous size distribution. The SCI, which combines diametric diversity with BA, was 2.35 times greater in Forests, confirming a more complex and developed structure. The left-skewed distribution of key structural variables (e.g., BA, DAB) reflects high heterogeneity within the population, likely resulting from environmental gradients and historical disturbances. Thus, while mean values are informative, they should be interpreted alongside measures of dispersion.

Table 1

Comparison of structural and diametric diversity variables between shrublands (Sh) and forests (F) of *P. tarapacana*

Variable	Sh (n = 77)	F (n = 19)	Test statistic	p-value
DAB (cm)	4.70 ± 2.09	8.43 ± 1.79	Wilcoxon, W = 126	<0.001
GiniDAB	0.39 ± 0.11	0.51 ± 0.08	t-test, t = -4.81	<0.001
ShannonDAB	1.32 ± 0.39	1.99 ± 0.20	t-test, t = -7.142	<0.001
BA (m ² /ha)	5.10 ± 4.78	14.37 ± 9.10	Wilcoxon, W = 185	<0.001
GiniBA	0.59 ± 0.11	0.64 ± 0.08	t-test, t = -1.822	0.072
H (m)	0.58 ± 0.19	0.87 ± 0.16	Wilcoxon, W = 163	<0.001
SCI	2.22 ± 1.42	5.22 ± 1.25	Wilcoxon, W = 98	<0.001
DAB/H Index	0.77 ± 0.17	0.94 ± 0.03	Wilcoxon, W = 134	<0.001

Note: DAB – mean diameter at the base; GiniDAB – Gini index for diameter inequality; ShannonDAB – Shannon diametric diversity index; BA – Basal area; GiniBA – Gini index for basal area inequality; H – Mean height; SCI – Structural Complexity Index; DAB/H Index – Diameter-to-height relationship index.

Structural and Functional Consequences of the Threshold: Life Form Composition and Diversity. Life form distribution differed between community types (Fig. 2). Forests were dominated by tree-like forms: the proportion of Ar individuals was significantly greater (34.0 vs. 21.8 % in shrublands; $p = 0.0028$), as was that of Dt (18.9 vs. 7.3 %; $p < 0.0001$). In contrast, shrublands – characterized by multi-stemmed forms – presented a higher proportion of shrubs (Sh) (52.4 vs. 40.8 %; $p = 0.0212$) and Bt (18.4 vs. 6.3 %; $p = 0.0034$).

Life Form Diversity Index was greater in forests (0.644 ± 0.069) than in shrublands (0.553 ± 0.090) (Wilcoxon, W = 172, $p = 0.028$) (Table 2). The mean difference was 0.091 index units, equivalent to 16.5 % greater functional diversity in forests. Internal variability was greater in shrublands (SD = 0.090) than in forests (SD = 0.069), reflecting greater heterogeneity in life form composition among shrubland plots.

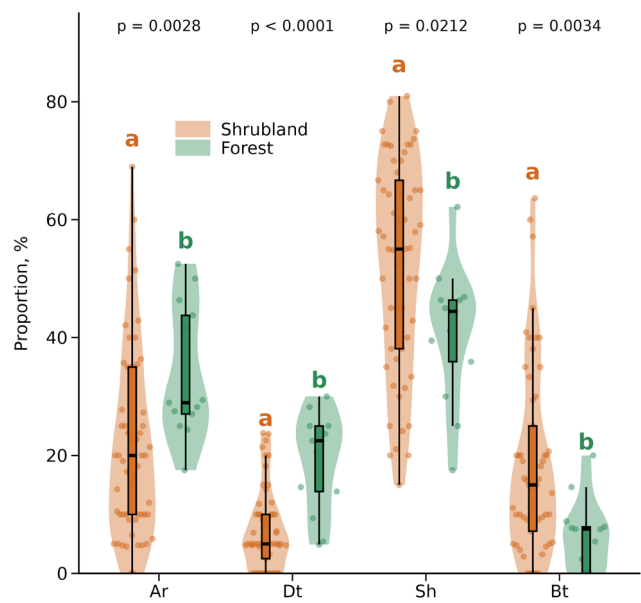


Fig. 2. Proportion of *P. tarapacana* life forms in forests (green) and shrublands (brown). Different letters (a, b) indicate significant differences between community types (Wilcoxon, $p < 0.05$). Points represent individual plots, violins show the distribution density, and boxplots show the quartiles

Table 2

Life Form Diversity Index in forests and shrublands of *P. tarapacana*

Community Type	LFDI ($\pm$ SD)	Range	p-value (Wilcoxon)
Forest	0.644 $\pm$ 0.069	0.534–0.743	0.028
Shrubland	0.553 $\pm$ 0.090	0.331–0.727	

Note: LFDI – Life Form Diversity Index, SD – Standard Deviation, Wilcoxon test $p < 0.05$ indicates significant difference between groups.

Population Structure, Allometry, and Diversity. Forests exhibited a more efficient height-diameter allometry (exponent 7.2 % greater than shrublands; $p < 0.001$; Fig. 3a) and significantly greater mean heights ($p < 0.001$; Fig. 3b). Diameter distribution contrasted between types: shrublands were dominated by small individuals (49.3 % in 0–5 cm class vs. 30.0 % in forests), while forests showed a more balanced structure with larger trees present (>25 cm: 7.3 vs. 0.9 %; Fig. 3c). Forests also displayed higher diametric diversity (ShannonDAB index ~ 1.8 vs. ~ 1.4) with lower size inequality (GiniDAB ~ 0.45 vs. ~ 0.55), reflecting multi-cohort, and equitable stands (Fig. 3d). MANOVA confirmed significant multivariate differences ($p < 0.001$).

Ground-Layer Functional Group Cover. Comparison of ground-layer functional group cover between shrublands and forests revealed significant differences for two of the five analyzed groups (Fig. 4). The forest ground layer showed a composition with greater cover of C P (4.05 vs. 2.68 % – $p = 0.0225$, Wilcoxon), while shrublands were dominated by P Sh (9.59 vs. 4.85 % – $p = 0.0021$, Wilcoxon). PERMANOVA was significant, and indicator species analysis revealed a set of 5–10 specialist forest species (e.g., SENU, OXHY) and shrubland species (e.g., SEVI). DB-RDA ordinated the plots primarily based on Ar proportion and FSI, showing a clear transition in ground-layer assemblage composition as the structural threshold is crossed.

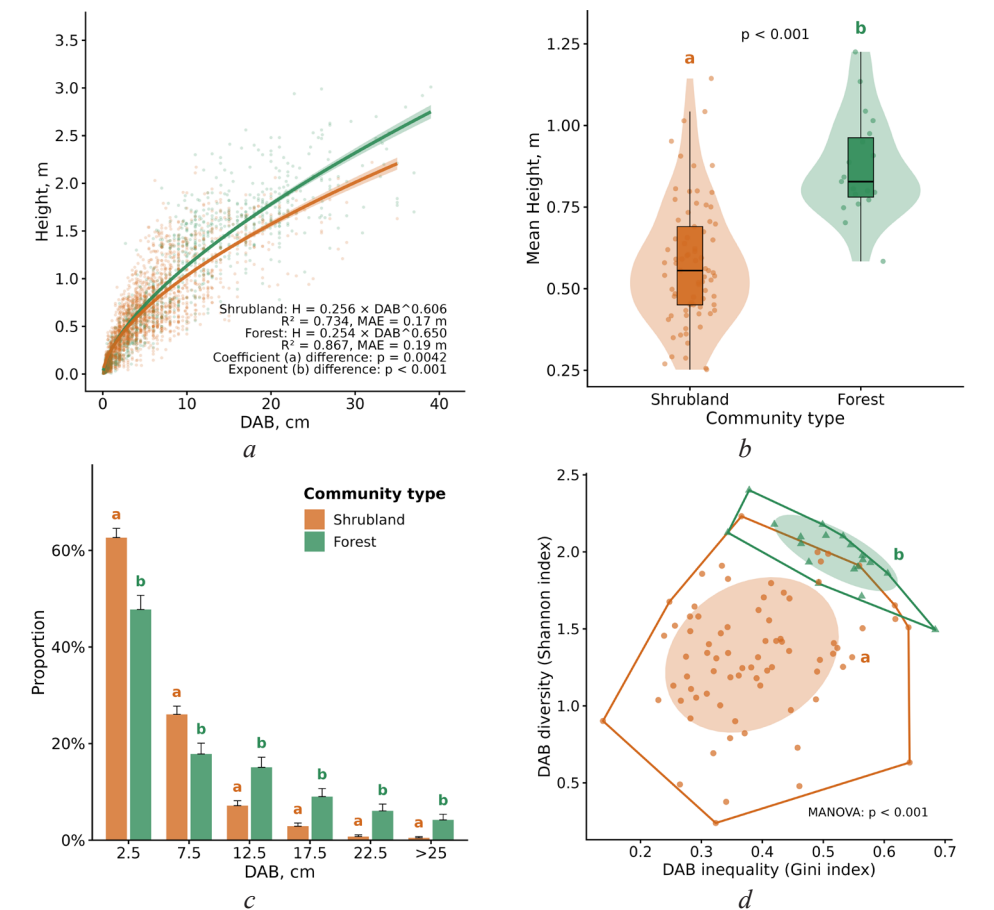


Fig. 3. Structural contrasts between shrublands and forests: *a* – Height-DAB relationship; *b* – HT in Forests and shrublands; *c* – Diameter distribution; *d* – Diametric diversity and inequality. Different letters indicate significant differences

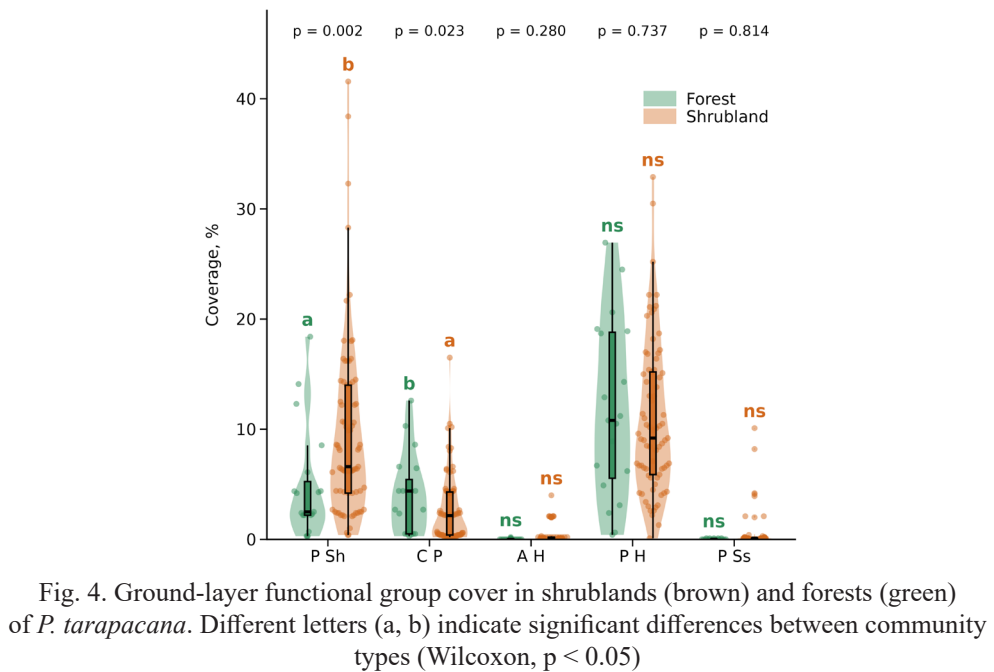


Fig. 4. Ground-layer functional group cover in shrublands (brown) and forests (green) of *P. tarapacana*. Different letters (a, b) indicate significant differences between community types (Wilcoxon, $p < 0.05$)

Indicator Species in Forests and Shrublands. Indicator species analysis revealed a predominance of forest-associated species: 4 of the 5 significant indicator species (80 %) corresponded to this community type (Table 3). The species *Senecio nutans* Sch. Bip. presented an indicator value (IndVal) of 0.938, reflecting an almost perfect association with forests and 100 % specificity (present in 19 plots, all classified as forest). The most represented functional group was P Sh (*S. nutans*, *Senecio viridis* Phil. var. *Viridis*, *Senecio punae* Cabrera and *Chiliotrichiopsis keidelii* Cabrera), followed by a single cushion plant (*Oxalis hypsophila* Phil.). In contrast, *S. viridis* was the only indicator species for shrublands (IndVal = 0.724), present mainly in this community type (83 % specificity). Globally, indicator species were found in 94.7 % of forests versus only 44.2 % of shrublands.

IndVal ranges from 0 (no association) to 1 (perfect association). Values > 0.35 indicate moderate to strong association with the given community type [7].

Table 3

Significant indicator species (p < 0.05) by functional group and community type					
Species	Functional Group	Community	IndVal	p-value	Interpretation
SENU	P Sh	Forests	0.938	<0.0001	Strong indicator
SEVI	P Sh	Shrublands	0.724	0.0067	Moderate indicator
SEPU	P Sh	Forests	0.585	0.0045	
OXHY	C P		0.498	0.0193	
CHKE	P Sh		0.358	0.0227	Weak Indicator

Note: Asteraceae: SENU (*Senecio nutans* Sch. Bip.), SEVI (*Senecio viridis* Phil. var. *Viridis*), SEPU (*Senecio punae* Cabrera) and CHKE (*Chiliotrichiopsis keidelii* Cabrera); Oxalidaceae: OXHY (*Oxalis hypsophila* Phil.).

Forests and Shrublands Along an Environmental-Structural Gradient. Our findings demonstrate that the MDH ≥ 2 m threshold is an ecological tipping point, beyond which microclimatic conditions enabling the development of a functional forest are established. This threshold marks a transition in the architecture, diversity, and structural complexity of *P. tarapacana*. The greater BA, diametric diversity, and vertical stratification in forests reflect an advanced successional state with greater occupancy and a complex structure that diversifies microenvironmental niches. This pattern aligns with observations in other high-Andean *P. tarapacana* woodlands, where shrublands show a marked reduction in H and diameter but high juvenile DEN, suggesting active regeneration with limited H growth [18]. The greater diametric inequality in forests could indicate heterogeneous recruitment and mortality dynamics, typical of mature communities, possibly mediated by thermal limitations that restrict meristematic activity more than carbon acquisition, as documented globally at treelines [17, 22].

The consistency of these patterns reinforces the utility of the threshold as a tool for classifying, monitoring, and conserving these vulnerable ecosystems. Although they operate under thermal conditions similar to other tropical treelines [24], *Polylepis* forests show unique adaptations in carbon allocation and root morphology to cope with the multiple stresses of the world’s highest elevations [20, 44]. For example, high-elevation *Polylepis* species have smaller leaves and a greater abundance of root apices-genetically determined traits that facilitate colonization of cold, dry environments [44]. Identifying this functional threshold, linked to measurable structural attributes and specific microsite conditions, provides a quantitative framework

for prioritizing conservation areas and designing effective restoration strategies in the Altiplano. Furthermore, protecting these forests is important for conserving associated biodiversity, including ground layer medicinal plants that constitute a vital resource for local communities and whose richness is influenced by forest structure and topographic variables [27].

P. tarapacana communities primarily develop along an environmental structural gradient, where forests – with greater BA and elevation – represent advanced successional stages or sites with more favorable environmental conditions [26]. Shrublands, characterized by a higher proportion of juveniles, could correspond to early developmental stages or environments with more severe constraints, such as poorly developed soils that promote high regeneration but restrict recruitment into larger size classes [16]. Indeed, previous studies have shown that human accessibility (distance to roads and market centers) is a strong predictor of structural degradation, with less accessible forests being better conserved [44].

The absence of significant differences on PC1 (associated with DEN and cover) suggests these attributes are common to both forests and shrublands, reflecting shared adaptive strategies to high-mountain stress [23]. Ecologically, PC1 represents a structural development gradient linked to DEN and slope, suggesting that denser sites are located on steeper slopes, possibly related to colonization processes in specific microsites [28]. PC2, in contrast, reflects an environmental structural gradient, with positive values associated with greater BA, Elev, and substrate quality. Forests at higher elevations show greater BA and better substrate, a pattern linked to greater insolation on north-facing slopes, which provides a thermal window for growth [18, 29]. In the Altiplano, solar radiation is exceptionally high and the daily thermal oscillation is the greatest in the world, creating an extreme environment where north exposure favors higher air temperatures [36]. In contrast, shrublands present a higher proportion of juveniles (<1.3 m), consistent with studies reporting high seedling abundance at the upper forest limit, where regeneration is not limiting, but post-emergence survival and growth beyond the protected microclimate near the ground are limiting [18, 28]. This differential distribution of growth forms has also been documented in Ecuadorian páramos, where P Sh and cushion plant cover varies with altitude and exposure [34].

For conservation, the strong separation on PC2 suggests that: (1) shrublands may be early successional stages or sites with strict environmental constraints, where carbon investment is preferentially directed to the root system as an adaptation to cold and low nutrient availability [16]; (2) forests correspond to mature stages under more favorable conditions, acting as unique carbon and biodiversity reservoirs [29]; and (3) juvenile cover (ShCoverI) is a sensitive indicator of developmental state and environmental pressures, useful for monitoring. Effective conservation of these forests requires considering these structural differences and their relationship with topographic and climatic factors [9, 29].

The ecology of *P. tarapacana* shows complex responses to environmental gradients, highlighting elevation as a structuring factor, associated mainly with soil temperature during the growing season, which globally averages 6–7 °C at the treeline [24]. However, *Polylepis* can grow at notably lower soil temperatures (~4.5–5.5 °C), suggesting specific physiological adaptations or that air temperature could be the more critical limiting factor [20, 36]. The pyramidal population structure (high proportion of juveniles) is common even at the upper limit, indicating continuous

recruitment [18], while environmental heterogeneity (exposure, substrate) modulates local growth potential [26]. Future research should incorporate variables such as extraction of large individuals for firewood (e.g., distance to settlements), microclimatic data to validate canopy thermal buffering, detailed edaphic characteristics – given the marked root investment under limiting conditions [16] – and long-term regeneration data to discern whether shrublands represent a stable successional stage or a persistent alternative state.

Population Structure and Dynamics. The results reveal profound structural contrasts between shrublands and forests of *P. tarapacana*, reflecting different successional stages and environmental conditions. The divergent H growth results suggest differentiated growth strategies: shrublands show a strategy with limited investment in H growth relative to diameter, possibly due to water, nutrient, or competitive stress [30]. This response is consistent with the restrictive conditions of the treeline, where low soil and air temperatures primarily limit meristematic activity and growth, more than photosynthesis [18, 21]. Indeed, studies of functional traits in *Polylepis* have shown that high-elevation species have reduced photosynthetic rates, suggesting source carbon limitation at the treeline, but also morphological adaptations like smaller leaves that may be linked to conservative growth [10, 44]. In contrast, forests, with greater H growth rates, optimize light capture in dense, stratified communities, indicating they surpass a critical threshold of environmental conditions that allows greater investment in vertical canopy expansion [20, 30]. The pronounced heterogeneity in structural parameters, evidenced by left-skewed distributions (Fig. 3), suggests that *P. tarapacana* communities are shaped by a mosaic of microsite conditions and possibly past anthropogenic impacts, a pattern also documented in other high-elevation woodlands [16].

The observed structural differentiation aligns with the concept of site quality, where the MDH is an indicator of a stand's productive capacity [1, 32]. Shrubbylands, presenting limited H growth relative to diameter [30], suggest establishment on lower-quality sites. These less favorable conditions, particularly at lower elevations and with a lower proportion of optimal microsites, impose thermal constraints that limit meristematic activity and growth more than carbon acquisition through photosynthesis [18, 21]. The lower investment in vertical expansion in shrubbylands is also interpreted as an adaptive strategy against water or nutrient stress [30], forcing a greater allocation of biomass to the root system to compensate for low nutrient availability and cold soil conditions [16]. Conversely, forests, which exhibit greater H growth rates and a more complex structure [30], occupy higher-quality sites where they have managed to mitigate or overcome these critical thresholds of environmental limitation [20, 30]. The lower HT in shrubbylands agrees with their simplified architecture, where most individuals occupy low strata (< 2 m), while forests develop multiple strata that increase structural complexity and niche diversity. This contrast may be related to microclimatic changes: under the forest canopy, the attenuation of extreme thermal amplitudes and reduced wind stress facilitate the survival of individuals in different strata [16]. The diameter distribution skewed towards small classes in shrubbylands (< 5 cm: ~50 %) suggests high regeneration but low recruitment into larger sizes, possibly due to differential mortality or growth limitations [6]. This demographic pattern, dominated by young, small individuals, has been interpreted as evidence that the critical phase is not germination, but the transition from seedling to sapling, when apical meristems emerge from the warmer air layer near the ground [18, 28].

The greater evenness (higher ShannonDAB) alongside lower inequality (lower GiniDAB and GiniBA) in forests indicates more mature communities with multiple coexisting cohorts, reflecting stable population dynamics and sustained recruitment [30]. These patterns align with the successional development model of high-Andean forests, where shrublands represent early stages or marginal sites subject to “sink limitations” for growth [17], and forests correspond to more advanced stages with better conditions for the full structural development of *P. tarapacana*, possibly associated with greater resource acquisition efficiency due to modifications in root morphology and better substrate quality [16, 26].

Structural and Functional Consequences of the Threshold: Life Form Composition and Diversity. Life forms in *P. tarapacana* respond to community type, reflecting differences in structural maturity, environmental conditions, and successional processes, consistent with the phenotypic plasticity of the genus documented along elevation gradients [26, 44]. This plasticity can include genetically determined functional traits, such as reduced leaf size and multiplied apices in high-elevation species, representing climatic adaptations to cold, dry conditions [10, 44]. The Bt form, associated with steep slopes, highlights the topographic influence on the configuration of these communities [26]. Furthermore, the distribution of *Polylepis* is often associated with terrain features that offer microclimatic refuge or protection from fire and grazing, especially at mid and low elevations [44]. In the Maure basin, Peru, *P. tarapacana* forests develop in sectors of low topographic protection, with low probability of aquifer interception, conditions that shape their architecture [9, 29].

Life forms can be used as rapid indicators of successional state [26]. The transition from shrubland to forest implies not only DEN changes but a compositional replacement towards more complex forms. For restoration, promoting seedlings with Ar potential could accelerate structural recovery, although the main limitation is not initial recruitment – often high even at the treeline [28] – but the conditions allowing subsequent survival and vertical growth [16, 18]. Factors such as the accessibility of forests and shrublands (distance to roads and settlements) also strongly predict structural degradation, so restoration must consider anthropogenic pressure [29, 44].

The greater Life Form Diversity Index suggests greater structural and functional complexity. This is interpreted from: (1) greater evenness in the distribution of forms, with coexistence of contrasting strategies facilitated by a canopy that moderates extreme microclimate [16]; (2) successional implications, where lower diversity in shrublands reflects dominance by few strategies in response to severe and homogeneous environmental limitations [23]; and (3) greater ecosystem resilience, as diversity of forms allows complementary responses to disturbances and favors functional stability. The greater form diversity in forests reinforces their character as an advanced successional stage with greater functional complexity, which has implications for the conservation and restoration of these high-Andean ecosystems.

Ground-layer Functional Group Cover. The results show a clear differentiation of ground-layer functional groups between shrublands and forests of *P. tarapacana*, reflecting microenvironmental and resource availability changes, consistent with patterns observed along Andean elevation gradients [27, 34]. The greater CC of P Sh in shrublands suggests pioneering strategies in exposed environments with greater thermal amplitude and water stress [18], extreme conditions that characterize the Altiplano, where daily thermal oscillation is the greatest in the world and solar

radiation is very intense [36]. In contrast, the greater abundance of C P in forests indicates more stable microclimatic conditions, with a canopy that buffers extreme thermal amplitudes [16] and more developed soils, reflecting conservative strategies typical of mature communities [27]. This closed canopy not only moderates temperature but may also reduce moisture loss and create protected microsites that favor regeneration [28, 44], a phenomenon also observed in high-Andean ground-layer assemblage studies where plant cover varies with elevation [5, 34].

A taller, more closed canopy modifies the underlying microclimate, buffering the extreme thermal amplitudes of the Altiplano and creating more stable conditions for the establishment of specialized ground layer species [16]. Studies in the Peruvian Andes highlight that *P. tarapacana* forests on dry, sunny slopes reach greater heights than on humid slopes, due to higher maximum air temperatures and greater solar radiation [20]. Likewise, ground-layer assemblage composition changes according to canopy structure: in Ecuadorian páramos, C P and P Sh cover varies significantly with elevation [34], a pattern consistent with the functional differentiation observed between our shrublands and forests. The marked preference of *P. tarapacana* for north exposures [9, 29] and its association with moisture-retaining rocky microsites [28] underscore the importance of local abiotic conditions for reaching this structural threshold. In the Argentine Altiplano, the cover and richness of ground layer medicinal plants also vary significantly with elevation [27].

The transition from shrubland to forest implies a functional replacement towards more specialized forms, signaling ecosystem maturation. The coexistence of both groups in forests suggests greater functional diversity and resilience, supported by the ability of *P. tarapacana* to maintain positive photosynthesis under limiting conditions [10]. Physiological studies on *Polylepis* have shown that, despite low temperatures, high-mountain species maintain photochemical efficiency and photoprotection mechanisms that enable survival in extreme environments [10, 36]. On the other hand, the absence of differences in P H, A H, and P Ss indicates these are generalist components regulated at the landscape scale, whose conservation requires broad habitat strategies [29]. Notably, many of these generalist species include widely distributed medicinal plants whose presence in the ground-layer assemblage does not vary significantly between structural types but constitutes a valuable ethnobotanical resource [27].

Future research should evaluate the causal mechanisms behind these differences, such as the role of canopy thermal buffering versus soil property changes mediated by root architecture [16], as well as the influence of historical and current anthropogenic factors in shaping these assemblages [44]. Integrating these dimensions is important for designing effective conservation and management strategies that ensure the persistence of these high-Andean forests [9, 29], considering both their ecological value and their importance as reservoirs of functional biodiversity and medicinal resources for local communities [27].

Beyond statistical indicators, the ecological roles of dominant life forms and indicator species underscore functional shifts across the threshold. Arborecent forms in forests likely act as nurse plants, moderating microclimate and facilitating the establishment of shade-tolerant herbs and C P. In contrast, shrublands are dominated by heliophytic shrubs that tolerate high radiation and temperature fluctuations, reflecting a pioneer strategy. This functional replacement highlights how the $MDH \geq 2$ m threshold captures not only structural but also ecosystem-level transitions.

Indicator Species in Forests and Shrublands. The indicator species analysis reveals that the shrubland-to-forest transition in *P. tarapacana* involves a complete replacement of the specialized ground-layer assemblage. *S. nutans* acts as a flagship species for mature forests, suggesting strict microenvironmental requirements dependent on conditions created by the closed *Polylepis* canopy [16]. These conditions result from a canopy that attenuates the extreme thermal amplitudes of the Altiplano, favoring organic matter accumulation and moisture retention [44], and generating microsites that buffer thermal stress for accompanying vegetation [2, 12]. It is noteworthy that *S. nutans* is recognized as a medicinal plant widely used in Andean pharmacopoeia [13, 27], adding ethnobotanical value to its role as an ecological indicator.

In contrast, *S. viridis* is associated with shrublands, reflecting tolerance to more extreme conditions – greater thermal amplitudes and wind exposure – typical of open-canopy sites [18], and could act as a pioneer species in active restoration. The marked preference of indicator species for specific canopy and microclimate conditions reinforces the idea that the $MDH \geq 2$ m structural threshold acts as an environmental filter that completely reorganizes ground-layer assemblages, selecting species based on their capacity to tolerate or benefit from the generated microclimatic conditions [14, 40, 41]. The marked asymmetry in indication (4 forest species vs. 1 shrubland) suggests greater niche specialization under forest conditions, where the stable canopy generates a diversity of exploitable microhabitats for specialists [14], while stronger environmental filters in shrublands, such as greater wind exposure and thermal amplitude [18], limit successful strategies to tolerant generalists [26]. The overrepresentation of P Sh among indicator species (4 of 5) confirms this group contains habitat specialists with strong microenvironmental preferences.

For monitoring and conservation, the presence of *S. nutans*, *S. punae*, and *O. hypsophila* signals mature forest with stable microclimatic conditions; the presence of *S. viridis* indicates early stages or degradation. Human accessibility (distance to roads and settlements) has been shown to be a strong predictor of structural degradation in *Polylepis* forests [44], so monitoring of indicator species should be complemented with measures of anthropogenic pressure [29]. Protecting these forests conserves not only forest structure but also the resource of associated medicinal plants, whose sustainable use should be integrated into management strategies [27], especially considering these ecosystems face constant threats from habitat loss and fragmentation [19, 35].

Among the limitations, the analysis does not consider interspecific interactions (facilitation, competition) that could modulate the patterns [4, 40, 41], nor abiotic factors such as human impact, soil depth, water availability, or soil temperature, which could better explain the relationship between *P. tarapacana* structure and its environment [16].

Conclusion

This study demonstrates that the transition between shrublands and functional forests of *Polylepis tarapacana* at the altitudinal treeline is defined by a discrete MDH threshold ($MDH \geq 2$ m) that synthesizes profound changes in community architecture, microenvironmental conditions, and associated biotic assemblages. The transition is mediated by the abundance of Ar life forms and the presence of favorable substrates, which together create a habitat supporting a distinctive and specialized

ground-layer assemblage. These substrates provide the necessary thermal window to overcome the growth limitations imposed by the low temperatures characteristic of the Altiplano.

Adopting a MDH threshold to define forests in these ecosystems aligns with the need for operational definitions that integrate structure, function, and landscape context, as proposed for native forests in Argentina. This approach makes it possible to move beyond merely morphological classifications and advance toward an ecological characterization that reflects the provision of ecosystem services, biodiversity conservation, and resilience to disturbance. The functional composition of the ground layer differs significantly between shrublands and forests: P Sh characterize early stages under exposed and variable conditions, while C P are associated with mature communities with stable microclimates. Complementarily, the indicator species analysis identified five species with strong associations to specific community types, providing valuable tools for monitoring, restoration assessment, and conservation.

Together, these findings provide a quantitative and ecologically robust framework for classifying, monitoring, and prioritizing conservation efforts in these extreme alpine ecosystems, which are particularly vulnerable to global climate change.

REFERENCES

1. Assmann E. *The Principles of Forest Yield Study: Studies in the Organic Production, Structure, Increment, and Yield of Forest Stands*. Oxford, Pergamon Press, 1970. 506 p.
2. Ball M.C. The Role of Photoinhibition During Tree Seedling Establishment at Low Temperatures. *Photoinhibition of Photosynthesis from Molecular Mechanisms to the Field*. Ed. by N.R. Baker, J.R. Bowyer. Oxford, BIOS Scientific Publishers, 1994, pp. 365–376.
3. Boza Espinoza T.E., Kessler M. A Monograph of the Genus *Polylepis* (Rosaceae). *PhytoKeys*, 2022, iss. 203, pp. 1–274. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.203.83529>
4. Brooker R.W., Maestre F.T., Callaway R.M., Lortie C.L., Cavieres L.A., Kunstler G. et al. Facilitation in Plant Communities: The Past, the Present, and the Future. *Journal of Ecology*, 2008, vol. 96, iss. 1, pp. 18–34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01295.x>
5. Carilla J., Halloy S., Cuello S., Grau A., Malizia A., Cuesta F. Vegetation Trends over Eleven Years on Mountain Summits in NW Argentina. *Ecology and Evolution*, 2018, vol. 8, iss. 23, pp. 11554–11567. <https://doi.org/10.1002/ece3.4602>
6. Cierjacks A., Rühr N.K., Wesche K., Hensen I. Effects of Altitude and Livestock on the Regeneration of Two Tree Line Forming *Polylepis* Species in Ecuador. *Plant Ecology*, 2008, vol. 194, pp. 207–221. <https://doi.org/10.1007/s11258-007-9285-x>
7. Dufrene M., Legendre P. Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approach. *Ecological Monographs*, 1997, vol. 67, no. 3, pp. 345–366. <https://doi.org/10.2307/2963459>
8. Efron B., Tibshirani R.J. *An Introduction to the Bootstrap*. New York, Chapman & Hall, 1993. 436 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4541-9>
9. Franco P., Cáceres C., Navarro M., Jove C., Ignacio J., Oyague E. Bosques de *Polylepis tarapacana* en la cuenca Maure, extremo Sur del Perú. Oportunidades para su Conservación. *Estudios Geográficos*, 2021, vol. 82, no. 290, art. e059. (In Span.). <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202071.071>
10. García-Plazaola J.I., Rojas R., Christie D.A., Coopman R.E. Photosynthetic Responses of Trees in High-Elevation Forests: Comparing Evergreen Species Along an Elevation Gradient in the Central Andes. *AOB PLANTS*, 2015, vol. 7, art. plv058. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv058>

11. Garreaud R., Vuille M., Clement A.C. The Climate of the Altiplano: Observed Current Conditions and Mechanisms of Past Changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, vol. 194, iss. 1-3, pp. 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)
12. Germino M.J., Smith W.K., Resor A.C. Conifer Seedling Distribution and Survival in an Alpine-Treeline Ecotone. *Plant Ecology*, 2002, vol. 162, pp. 157–168. <https://doi.org/10.1023/A:1020385320738>
13. Giberti G.C. Herbal Folk Medicine in Northwestern Argentina: Compositae. *Journal of Ethnopharmacology*, 1983, vol. 7, iss. 3, pp. 321–341. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(83\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0378-8741(83)90006-5)
14. Gilliam F.S. The Ecological Significance of the Herbaceous Layer in Temperate Forest Ecosystems. *BioScience*, 2007, vol. 57(10), pp. 845–858. <https://doi.org/10.1641/B571007>
15. Gini C. Variabilità e Mutabilità. *Memorie di Metodologica Statistica*. Ed. by E. Pi-zetti, T. Salvemini. Rome, Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1912. (In It.).
16. Hertel D., Wesche K. Tropical Moist *Polylepis* Stands at the Treeline in East Bolivia: The Effect of Elevation on Stand Microclimate and Above- and Below-Ground Patterns. *Trees*, 2008, vol. 22, pp. 303–315. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0185-4>
17. Hoch G., Körner C. The Carbon Charging of Pines at the Climatic Treeline: A Global Comparison. *Oecologia*, 2003, vol. 135(1), pp. 10–21. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1154-7>
18. Hoch G., Körner C. Growth, Demography and Carbon Relations of *Polylepis* Trees at the World's Highest Treeline. *Functional Ecology*, 2005, vol. 19, iss. 6, pp. 941–951. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01040.x>
19. Kessler M. Bosques de *Polylepis*. *Botánica Económica de los Andes Centrales*. Ed. by R.M. Moraes, B. Øllgaard, L.P. Kvist, F. Borchsenius, H. Balslev. La Paz, Universidad Mayor de San Andrés, 2006, pp. 110–120. (In Span.).
20. Kessler M., Toivonen J.M., Sylvester S.P., Kluge J., Hertel D. Elevational Patterns of *Polylepis* Tree Height (Rosaceae) in the High Andes of Peru: Role of Human Impact and Climatic Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 2014, vol. 5, art. 194. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00194>
21. Kharuk V.I., Petrov I.A., Im S.T., Golyukov A.S., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S. Tree Clusters Migration into Alpine Tundra, Siberia. *Journal of Mountain Science*, 2022, vol. 19, iss. 12, pp. 3426–3440. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7555-7>
22. Körner C. A Re-Assessment of High Elevation Treeline Positions and Their Explanation. *Oecologia*, 1998, vol. 115, pp. 445–459. <https://doi.org/10.1007/s004420050540>
23. Körner C. *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Berlin, Springer, 2003. 349 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-18970-8>
24. Körner C., Paulsen J. A World-Wide Study of High Altitude Treeline Temperatures. *Journal of Biogeography*, 2004, vol. 31, iss. 5, pp. 713–732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x>
25. Levene H. Robust Tests for Equality of Variances. *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Ed. by I. Olkin, S.G. Ghurye, W. Hoeffding, W.G. Madow, H.B. Mann. Stanford, CA, Stanford University Press, 1960, pp. 278–292.
26. López V.L., Botta L., Martínez Pastur G., Lencinas M.V., Cuyckens G.A.E., Cellini J.M. Characterization of *Polylepis tarapacana* Life Forms in the Highest-Elevation Altiplano in South America: Influence of the Topography, Climate and Human Uses. *Plants*, 2023, vol. 12, art. 1806. <https://doi.org/10.3390/plants12091806>
27. López V.L., Cellini J.M. Plantas medicinales asociadas a bosques de *Polylepis tarapacana* del altiplano jujeño: Riqueza y cobertura en gradientes geográficos, topográficos y de estructura forestal. *Ecología Austral*, 2022, vol. 32, no. 3, pp. 894–907. (In Span.). <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.3.0.1905>

28. López V.L., Cellini J.M., Cuyckens G.A.E. Influencia del micrositio y el ambiente en la instalación de *Polylepis tarapacana* en los Altos Andes. *Neotropical Biodiversity*, 2021, vol. 7(1), pp. 135–145. (In Span.). <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1902251>
29. López V.L., Huertas Herrera A., Rosas Y.M., Cellini J.M. Optimal Environmental Drivers of High-Mountains Forest: *Polylepis tarapacana* Cover Evaluation in Their Southernmost Distribution Range of the Andes. *Trees, Forests and People*, 2022, vol. 9, art. 100321. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100321>
30. López V.L., Martínez Pastur G., Cellini J.M. Forest and Shrubland Structure of *Polylepis tarapacana* in Topographic and Substrate Gradients Across the Argentine Altiplano. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2025, vol. 55. <https://doi.org/10.33494/nzjfs552025x319x>
31. Mann H.B., Whitney D.R. On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, no. 1, pp. 50–60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
32. Martínez Pastur G., Amoroso M.M., Baldi G., Barrera M.D., Brown A.D., Chauchard L.M., et al. ¿Qué es un bosque nativo en la Argentina? Marco conceptual para una correcta definición de acuerdo con las políticas institucionales nacionales y el conocimiento científico disponible. *Ecología Austral*, 2023, vol. 33(1), pp. 152–169. (In Span.). <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.1.0.2040>
33. Oehlert G.W. A Note on the Delta Method. *The American Statistician*, 1992, vol. 46(1), pp. 27–29. <https://doi.org/10.1080/00031305.1992.1047842>
34. Ramsay P.M., Oxley E.R.B. The Growth Form Composition of Plant Communities in the Ecuadorian Páramos. *Plant Ecology*, 1997, vol. 131, pp. 173–192. <https://doi.org/10.1023/A:1009796224479>
35. Renison D., Cuyckens G.A.E., Pacheco S., Guzmán G.F., Grau H.R., Marcora P., et al. Distribución y estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género *Polylepis* (Rosaceae) en las montañas de Argentina. *Ecología Austral*, 2013, vol. 23(1), pp. 27–36. (In Span.). <https://doi.org/10.25260/EA.13.23.1.0.1189>
36. Rojas R., Flexas J., Coopman R.E. Particularities of the Highest Elevation Treeline in the World: *Polylepis tarapacana* Phil. as a Model to Study Ecophysiological Adaptations to Extreme Environments. *Flora*, 2022, vol. 292, art. 152076. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152076>
37. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, iss. 3, pp. 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
38. Shapiro S.S., Wilk M.B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 1965, vol. 52, iss. 3-4, pp. 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
39. Simpson E.H. Measurement of Diversity. *Nature*, 1949, vol. 163, iss. 4148, art. 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
40. Soliveres S., Maestre F.T. Plant–Plant Interactions, Environmental Gradients and Plant Diversity: A Global Synthesis of Community-Level Studies. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2014, vol. 16, iss. 4, pp. 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2014.04.001>
41. Soliveres S., Maestre F.T., Berdugo M., Allan E. A Missing Link Between Facilitation and Plant Species Coexistence: Nurses Benefit Generally Rare Species More than Common Ones. *Journal of Ecology*, 2015, vol. 103, iss. 5, pp. 1183–1189. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12447>
42. Spearman C. The Proof and Measurement of Association Between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 1904, vol. 15, no. 1, pp. 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>
43. Staudhammer C.L., LeMay V.M. Introduction and Evaluation of Possible Indices of Stand Structural Diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 31(7), pp. 1105–1115. <https://doi.org/10.1139/x01-033>

44. Toivonen J.M., Horna V., Kessler M., Ruokolainen K., Hertel D. Interspecific Variation in Functional Traits in Relation to Species Climatic Niche Optima in Andean *Polylepis* (Rosaceae) Tree Species: Evidence for Climatic Adaptations. *Functional Plant Biology*, 2014, vol. 41, iss. 3, pp. 301–312. <https://doi.org/10.1071/FP13210>

45. *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Report of the Conference of the Parties on its Seventh Session, Held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001*. FCCC/CP/2001/13/Add.1. United Nations, 2002. 69 p. Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a01.pdf> (accessed 17.12.25).

46. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1945, vol. 1, no. 6, pp. 80–83. <https://doi.org/10.2307/3001968>

47. Wilks S.S. Certain Generalizations in the Analysis of Variance. *Biometrika*, 1932, vol. 24, iss. 3/4, pp. 471–494. <https://doi.org/10.1093/biomet/24.3-4.471>

48. Yates F. Contingency Tables Involving Small Numbers and the χ^2 Test. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1934, vol. 1, iss. 2, pp. 217–235. <https://doi.org/10.2307/2983604>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Научная статья

УДК 630.232:582.475+630.181.2+630.228.7

DOI 10.37482/0536-1036-2026-3-30-40

Показатели роста разновозрастных географических культур *Pinus sibirica* Du Tour

Р.Н. Матвеева, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAB-9159-2019](https://orcid.org/0000-0002-3476-9622),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-9622>

А.М. Пастухова, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [MGB-4138-2025](https://orcid.org/0000-0003-0024-9925),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0024-9925>

Н.А. Шенмайер✉, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [MGB-6622-2025](https://orcid.org/0000-0001-8879-4412),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8879-4412>

Е.А. Громов, лаборант-исследователь; ResearcherID: [MGB-6090-2025](https://orcid.org/0009-0000-2034-5565),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2034-5565>

А.В. Мантулина, аспирант, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [MGB-6073-2025](https://orcid.org/0000-0001-7780-6633),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7780-6633>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; matveevrn@yandex.ru, albinp@yandex.ru, schenmaier@yandex.ru✉, nyamker@gmail.com, lina.mantulina@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.04.25 / Одобрена после рецензирования 07.07.25 / Принята к печати 10.07.25

Аннотация. Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) представляет собой важнейший лесообразующий вид в сибирской тайге. Целью данного исследования стало изучение возрастных изменений роста сосны кедровой сибирской разного географического происхождения. Работы проведены на лесосеменной плантации «Известковая» в Учебно-опытном лесхозе Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнёва в пригородной зоне г. Красноярска (Среднесибирский подтаежно-лесостепной район). Взяты потомства 37 лет и 61 года бирюсинского, шумихинского (Красноярский край), черемховского (Иркутская область) и читинского (Забайкальский край) происхождений. Установлено, что в 37-летнем возрасте средняя высота деревьев разного географического происхождения варьировала от 5,1 до 7,4 м – шумихинское и черемховское происхождения соответственно. В 61-летнем возрасте средняя высота деревьев составила от 13,5 до 16,1 м – шумихинское и черемховское происхождения соответственно. Показано снижение дифференциации деревьев по росту со смыканием крон. При этом более интенсивно это проявляется для высоты, менее – для диаметра ствола. Наблюдается также географическая изменчивость адаптации растений к условиям произрастания. Редукционные числа для высоты варьировали от 0,50 до 1,46 в 37-летнем возрасте и от 0,79 до 1,23 – в 61-летнем. Распределение деревьев по диаметру ствола более равномерно. Перспективными для сбора семян и создания плантационных культур с высокой интенсивностью роста в данных условиях произрастания являются местные бирюсинский и черемховский климатипы. По таким признакам, как интенсивность роста, формирование кроны и длина хвои, отобраны деревья для вегетативного размножения с целью заготовки черенков и выращивания привитого посадочного материала. Наибольшую ценность представляют деревья, сочетающие данные признаки: Би-61, Би-33 бирюсинского, Че-2, Че-17, Че-51 черемховского и Чи-10 читинского происхождений.

© Матвеева Р.Н., Пастухова А.М., Шенмайер Н.А., Громов Е.А., Мантулина А.В., 2026



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

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, *Pinus sibirica* Du Tour, географическая изменчивость, динамика роста, диаметр ствола, высота дерева, редуccionные числа, отбор деревьев, происхождение деревьев, сибирская тайга

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

Для цитирования: Матвеева Р.Н., Пастухова А.М., Шенмайер Н.А., Громов Е.А., Мانتулина А.В. Показатели роста разновозрастных географических культур *Pinus sibirica* Du Tour // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 30–40.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-30-40>

Original article

Growth Traits of Mixed-Age Provenance Trial Plantations of *Pinus sibirica* Du Tour

Rimma N. Matveeva, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAB-9159-2019](https://orcid.org/0000-0002-3476-9622),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-9622>

Albina M. Pastuhova, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [MGB-4138-2025](https://orcid.org/0000-0003-0024-9925),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0024-9925>

Natalya A. Schenmaier[✉], Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [MGB-6622-2025](https://orcid.org/0000-0001-8879-4412), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8879-4412>

Evgeniy A. Gromov, Laboratory Research Assistant; ResearcherID: [MGB-6090-2025](https://orcid.org/0009-0000-2034-5565),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2034-5565>

Alina V. Mantulina, Postgraduate Student, Junior Research Scientist;

ResearcherID: [MGB-6073-2025](https://orcid.org/0000-0001-7780-6633), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7780-6633>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, Russia, 660037; matveevrn@yandex.ru, albinp@yandex.ru, schenmaier@yandex.ru[✉], nyamker@gmail.com, lina.mantulina@inbox.ru

Received on April 12, 2025 / Approved after reviewing on July 7, 2025 / Accepted on July 10, 2025

Abstract. Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) is the most important forest-forming species in the Siberian taiga. The research aimed at studying the age-related changes in the growth rates of Siberian pine trees (37- and 61-year-old) depending on their geographical origin. The work was carried out at the Izvestkovaya forest seed plantation located in the Educational and Experimental Forestry of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology in the suburban area of Krasnoyarsk. This territory belongs to the Central Siberian subtaiga forest steppe district according to the forest-growing zoning. We took the offspring of Biryusa, Shumikha (Krasnoyarsk territory), Cheremkhovo (Irkutsk region) and Chita (Zabaykalsky territory) origin. The average height of 37-year-old trees of different geographical origin was found to be ranged from 5.1 to 7.4 m – Shumikha and Cheremkhovo origin, respectively. The average height of 61-year-old trees ranged from 13.5 to 16.1 m – Shumikha and Cheremkhovo origin, respectively. Studies have shown that with the crown closure, the difference in tree heights decreases. Moreover, this is more intense for the height,

and less so for the trunk diameter. There is a geographical variation in plant adaptation to the changing growing conditions. The calculated height reduction numbers ranged from 0.50 to 1.46 at the age of 37 and from 0.79 to 1.23 at the age of 61. The distribution of trees along the trunk diameter is more uniform. The local climatypes (Biryusa and Cheremkhovo) are promising for seed collection and creation of plantation crops with high growth intensity in these growing conditions. In order to harvest cuttings and grow grafted planting material for vegetative propagation, trees were selected based on such traits as growth intensity, crown shaping, and needle length. The most valuable trees are those that merge the following traits: Би-61 and Би-33 (Biryusa origin); Че-2, Че-17 and Че-51 (Cheremkhovo origin); and Чи-10 (Chita origin).

Keywords: Siberian pine, *Pinus sibirica* Du Tour, geographical variation, growth dynamics, trunk diameter, tree height, reduction numbers, tree selection, tree origin, Siberian taiga

Acknowledgements: The research was carried out by the team of the scientific laboratory “Breeding of Woody Plants” on the topic “Breeding and Genetic Basis for the Formation of Target Plantations and the Sustainable Use of Wood Resources in the Krasnoyarsk Territory (Yenisei Siberia)” within the framework of the state assignment No. FEFE-2024-0013 as requested by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Matveeva R.N., Pastuhova A.M., Schenmaier N.A., Gromov E.A., Mantulina A.V. Growth Traits of Mixed-Age Provenance Trial Plantations of *Pinus sibirica* Du Tour. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 30–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-30-40>

Введение

Изучение географической изменчивости древесных видов приобретает особую актуальность в связи с изменениями климата. Действующие рекомендации по предпочтительному использованию местных семян при лесовосстановлении в меняющихся внешних условиях требуют проведения дополнительных исследований по выявлению способности к адаптации инорайонных генотипов, что может стать их важным преимуществом перед местными [13]. Целесообразна организация многолетнего изучения интенсивности роста географических культур древесных растений. Так, по данным 100-летних наблюдений в географических культурах сосны обыкновенной выявлено, что устойчивые и высокопродуктивные культуры можно выращивать и из семян, заготовленных в северных и восточных регионах России [14]. Отмечено также, что в направлении с севера на юг рост культур улучшается, но их сохранность уменьшается [20]. На примере сосны обыкновенной ведется моделирование переноса семян в другие районы [15]. Установлено, что интенсивность роста, свойства древесины, биотическая и абиотическая адаптация к стрессовым факторам окружающей среды наследуются [16]. Влияние географического происхождения изучается по росту, свойствам древесины, длине хвои и др. [12, 17]. Исследование генетического разнообразия древесных видов актуально для ведения лесного хозяйства и сохранения биоразнообразия видов [18, 19].

Сосна кедровая сибирская известна своими хозяйственно-ценными свойствами и экологичностью [4, 9]. Использование данного вида перспективно не только для условий Сибири, но и для Южного Урала и Среднего Поволжья [1, 6]. Сосна кедровая сибирская отличается возможностью длительного прижизненного использования в качестве источника семян с высо-

кими питательными свойствами. Большой объем фитомассы, долговечность позволяют рекомендовать данный вид для плантационного выращивания насаждений с высокой углеродной емкостью. Создание целевых плантаций основывается на применении сортового посадочного материала, отобранных биотипов, наиболее продуктивных по искомым признакам в конкретных условиях выращивания [5].

Сосна кедровая сибирская в географических культурах и при интродукции высоко полиморфна, пластична [3, 8, 10, 11]. Было установлено, что в условиях оптимума произрастания из инорайонных климатипов схожими показателями роста и сохранности с местными вариантами отличаются кедровые деревья из Томской области (Шегаро-Чулымский лесосеменной район) [2].

Целью данной работы стало изучение возрастных изменений роста сосны кедровой сибирской разного географического происхождения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования были деревья сосны кедровой сибирской разного географического происхождения, произрастающие на лесосеменной плантации «Известковая», в учебно-опытном лесхозе Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнёва. Опытный объект площадью 0,3 га был заложен в 1982 г. посадкой 18-летних растений разного географического происхождения по схеме 5×5 м. По лесорастительному районированию данная территория относится к Среднесибирскому подтаежно-лесостепному району. Почвы серые лесные, суглинистые, слабооподзоленные. Измерения высоты деревьев в 37-летнем биологическом возрасте проводились в 2000 г. с использованием мерного шеста, в 61-летнем – в 2024 г. ультразвуковым высотомером Nikon у тех же деревьев, что и в 2000 г. Объем выборки составил 130 деревьев. Диаметр деревьев фиксировали на высоте 1,3 м мерной вилкой, диаметр кроны – мерной лентой в 2 противоположных направлениях – север–юг, запад–восток – с определением среднего значения.

Семена для выращивания посадочного материала были собраны в насаждениях Красноярского края, Иркутской области и Забайкальского края (табл. 1).

Таблица 1

Место сбора семян сосны кедровой сибирской
Siberian pine seed collection site

Географическое происхождение	Место сбора	Координаты, ...°		Высота над уровнем моря, м
		с. ш.	в. д.	
Бирюсинское	Красноярский край	56°00′	92°40′	300
Шумихинское		56°00′	92°40′	500
Черемховское	Иркутская область	53°00′	102°36′	960
Читинское	Забайкальский край	53°22′	108°43′	1000

Результаты исследования и их обсуждение

В 37-летнем биологическом возрасте наблюдался интенсивный рост деревьев и начало их вступления в репродуктивную фазу развития. В 61-летнем возрасте происходило смыкание крон, что сказывается на состоянии и развитии деревьев.

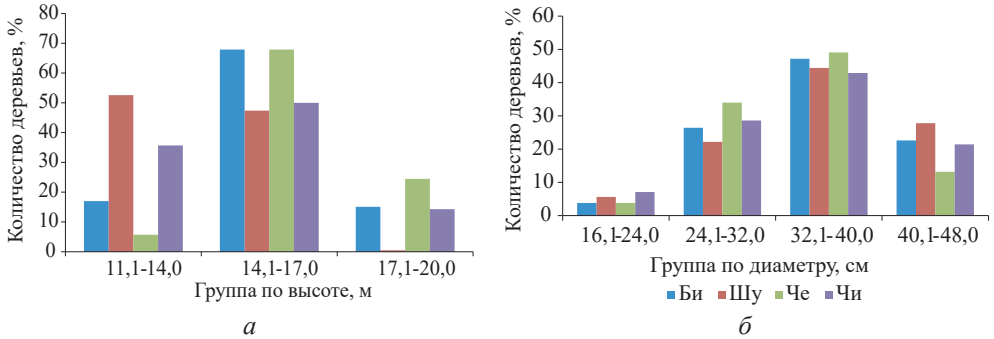
Изменчивость высоты и диаметра 37- и 61-летних деревьев приведена в табл. 2. Высота деревьев в 37-летнем возрасте в зависимости от географического происхождения варьирует от 7,4 м для черемховского до 5,1 м для шумихинского, диаметр ствола от 14,7 см для черемховского до 9,7 см для читинского. Уровень изменчивости высоты деревьев в данном возрасте средний.

Таблица 2

Высота и диаметр ствола сосны кедровой сибирской
Siberian pine trunk height and diameter

Географическое происхождение	37-летние деревья				61-летние деревья			
	$\bar{X} \pm m$	V, %	лимиты	t_{ϕ}	$\bar{X} \pm m$	V, %	лимиты	t_{ϕ} (при $t_{05}=2,04$)
Высота, м								
Бирюсинское	7,0±0,17	17,5	3,8–9,0	–	15,6±0,19	8,4	12,3–18,3	–
Шумихинское	5,1±0,25	17,4	3,9–6,9	6,28	13,5±0,41	11,7	11,4–16,2	4,65
Черемховское	7,4±0,16	15,7	5,1–10,8	1,71	16,1±0,20	8,7	13,0–19,8	1,81
Читинское	5,2±0,26	19,2	3,7–6,9	5,79	14,9±0,41	10,3	12,3–17,7	1,55
Диаметр ствола, см								
Бирюсинское	13,6±0,41	21,7	6,6–18,7	–	34,5±0,82	17,1	18,1–45,7	–
Шумихинское	11,2±0,64	20,5	6,6–15,2	3,16	34,1±1,74	19,1	20,1–43,0	0,21
Черемховское	14,7±0,39	19,0	13,8–16,0	1,94	33,9±0,71	15,3	22,3–44,5	0,56
Читинское	9,7±0,65	25,1	6,0–13,6	5,07	34,6±1,98	21,4	18,2–46,2	0,04

В 61 год изменчивость деревьев по высоте низкая, по диаметру ствола – в основном средняя. Наблюдается смыкание крон у отдельных деревьев. Преобладают особи высотой 14,1–17,0 м, доля быстрорастущих экземпляров меньше, чем медленнорастущих. Однако соотношение между крайними группами по диаметру ствола, напротив, смещено в сторону активно растущих (см. рисунок).



Распределение 61-летних деревьев: а – по высоте; б – по диаметру ствола.
Географическое происхождение: Би – бирюсинское; Шу – шумихинское;
Че – черемховское; Чи – читинское
Distribution of 61-year-old trees by: а – height; б – trunk diameter. Geographical origin:
Би – Biryusa; Шу – Shumikha; Че – Cheremkhovo; Чи – Chita

Для анализа особенностей ростовых процессов сосны кедровой сибирской разного географического происхождения в 37- и 61-летнем возрасте установлено их редуktionное число, т. е. отношение высоты и диаметра дерева к средним значениям этих показателей. Наибольшую дифференциацию

по высоте имели деревья бирюсинского происхождения в 37-летнем возрасте. С возрастом распределение сглаживается, причем как внутри популяций, так и между ними. За 24 года наблюдается перераспределение деревьев в крайних рангах – самых медленно- и быстрорастущих. Это можно отчасти связать с переходом деревьев в данный период в репродуктивную стадию развития, которая, очевидно, быстрее наступает при активном наращивании надземной части деревьев; а также с началом смыкания культур и обострением конкуренции внутри фитоценоза. Такие особенности смены рангов с возрастом отмечались и у разных климатипов сосны обыкновенной [7].

Распределение деревьев по редукционным числам для диаметра ствола изменяется не так резко, как для высоты. Сохранность деревьев во всех группах хорошая, за исключением шумихинской, где показатель самый низкий с момента посадки (табл. 3, 4).

Таблица 3

Распределение деревьев по редукционным числам высоты, %
Trees' distribution by height reduction numbers, %

Географическое происхождение	Редукционное число по группам высот (м)			
	0,50–0,90	0,91–1,10	1,11–1,20	1,21–1,50
37 лет				
Бирюсинское	17,3	53,8	19,2	9,7
Шумихинское	23,1	53,8	15,4	7,7
Черемховское	7,8	76,5	3,9	11,8
Читинское	21,4	50,0	14,3	14,3
61 год				
Бирюсинское	1,9	86,6	11,5	0
Шумихинское	0	66,7	33,3	0
Черемховское	0	92,0	6,0	2,0
Читинское	0	84,6	15,4	0

Таблица 4

Распределение деревьев по редукционным числам диаметра ствола, %
Trees' distribution by trunk diameter reduction numbers, %

Географическое происхождение	Редукционное число по группам высот (м)			
	0,50–0,90	0,91–1,10	1,11–1,20	1,21–1,60
37 лет				
Бирюсинское	15,4	46,2	21,1	17,3
Шумихинское	15,4	61,5	15,4	7,7
Черемховское	17,6	51,0	19,6	11,8
Читинское	21,4	50,0	7,2	21,4
61 год				
Бирюсинское	15,4	53,8	23,1	7,7
Шумихинское	0	72,7	27,3	0
Черемховское	12,0	60,0	16,0	12,0
Читинское	7,7	61,5	15,4	15,4

Изменчивость по диаметру и протяженности кроны на начальном этапе смыкания крон остается на высоком уровне. При этом более широкую крону имеют деревья читинского происхождения в отличие от бирюсинского (табл. 5).

Таблица 5

Показатели кроны в зависимости от географического происхождения
Crown values depending on geographical origin

Географическое происхождение	Протяженность, м		Диаметр, м	
	$\overline{X} \pm m$	t_{ϕ}	$\overline{X} \pm m$	t_{ϕ}
Бирюсинское	12,1±0,27	—	6,8±0,15	—
Шумихинское	10,5±0,49	2,86	6,9±0,30	0,30
Черемховское	10,2±0,33	5,72	6,2±0,12	3,12
Читинское	12,2±0,55	0,16	7,6±0,30	2,39

На начальном этапе создания искусственных насаждений с высокой интенсивностью роста важно провести отбор экземпляров, обладающих такими свойствами. В 37-летнем возрасте были выделены деревья высотой более чем на 10 % превосходящей среднюю, которые и в 61 год имели превышение показателя: Би-3, Би-4, Би-6, Би-8, Би-25, Би-26 бирюсинского происхождения, Че-17, Че-49, Че-57 черемховского, Чи-34, Чи-39 читинского и Шу-15, Шу-55, Шу-56 шумихинского (табл. 6).

Таблица 6

Характеристики отобранных 61-летних деревьев
Parameters of selected 61-year-old trees

Географическое происхождение	Дерево	Доля от среднего значения, %			
		высота	диаметр кроны	протяженность кроны	длина хвои
По 4 показателям					
Бирюсинское	Би-61	106,0	113,8	107,3	106,4
	Би-33	115,6	105,7	132,5	107,9
Черемховское	Че-2	106,7	122,8	129,7	117,3
	Че-17	114,1	105,7	136,2	107,2
	Че-51	105,4	104,1	142,6	115,1
Читинское	Чи-10	105,3	108,5	104,0	111,1
По 3 показателям					
Бирюсинское	Би-2	112,4	80,6	117,6	110,1
	Би-3	111,1	98,3	116,6	115,6
	Би-6	110,5	90,9	128,8	109,4
	Би-7	110,0	75,4	112,0	107,1
	Би-20	106,0	85,7	114,8	112,9
	Би-55	100,9	122,0	121,3	113,2
	Би-56	100,3	122,7	128,8	115,6
Черемховское	Би-60	99,0	115,3	109,2	115,5
	Че-52	89,9	120,3	110,2	116,0
Читинское	Че-57	109,8	126,0	107,0	100,7
	Чи-9	102,6	115,2	119,8	108,7
Шумихинское	Чи-39	117,2	100,3	128,8	112,4
	Шу-15	111,4	108,3	116,0	97,7
	Шу-55	117,3	131,9	125,9	109,3

Окончание табл. 6

Географическое происхождение	Дерево	Доля от среднего значения, %			
		высота	диаметр кроны	протяженность кроны	длина хвои
По 2 показателям					
Бирюсинское	Би-8	116,9	74,7	98,9	114,7
	Би-12	97,1	113,8	111,2	101,8
	Би-23	102,8	116,0	131,6	75,9
	Би-25	114,3	102,0	117,6	95,9
	Би-26	107,9	104,2	133,4	93,3
	Би-28	93,2	93,9	138,1	118,1
	Би-31	86,8	79,1	112,0	108,0
	Би-39	100,9	122,0	106,4	111,7
	Би-54	104,7	119,0	112,0	104,0
	Би-57	89,4	132,3	97,0	106,7
	Би-58	91,3	124,9	128,8	92,5
	Би-59	92,0	116,8	80,2	106,1
	Би-62	95,8	123,4	102,6	121,3
	Би-64	104,7	101,3	112,9	88,7
	Би-65	100,3	102,7	119,4	106,7
Черемховское	Че-1	101,1	130,1	150,7	100,0
	Че-8	90,5	148,0	102,1	125,9
	Че-11	105,4	111,4	97,3	101,1
	Че-26	102,9	112,2	94,0	117,5
	Че-39	96,7	110,6	110,2	101,8
	Че-48	91,2	87,0	129,7	115,0
	Че-49	122,8	100,0	117,5	90,3
	Че-56	100,5	125,2	105,9	82,1
Читинское	Чи-34	115,2	113,4	100,6	84,4
	Чи-40	104,0	93,6	142,4	100,1
Шумихинское	Шу-56	119,5	102,3	121,5	96,6
По 1 показателю					
Бирюсинское	Би-4	107,3	86,5	112,9	90,4
	Би-5	101,5	81,3	122,2	87,9
	Би-10	85,6	80,6	112,0	89,5
	Би-48	99,0	104,2	115,7	90,1
	Би-53	99,0	133,0	96,1	100,4
Черемховское	Че-4	104,8	110,6	102,1	88,5
	Че-22	102,9	102,4	110,2	96,9
	Че-42	96,1	98,4	110,2	97,0
	Че-50	116,6	89,4	85,9	95,1
	Че-59	90,5	83,7	77,8	118,5
Читинское	Че-60	103,6	104,1	110,2	102,0
	Чи-2	87,4	111,1	63,3	80,1

По экологической эффективности, включая такие показатели, как диаметр, протяженность кроны и длину хвои, значительно превосходят в 61-летнем возрасте остальные экземпляры дерева Че-2, Че-52 и Би-55, Би-56. Кроме того, к длиннохвойным отнесены деревья Че-8, Че-26, Че-48, Че-51, Че-58,

Че-59; Би-3, Би-60, Би-28, Би-62, длина хвои которых превышала на 15 % и более среднее значение по происхождениям.

Заключение

Установлено, что независимо от географического происхождения (бирюсинское, черемховское, читинское, шумихинское) отдельные деревья сосны кедровой сибирской, произрастая в условиях Учебно-опытного лесхоза Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнёва, в 37- и 61-летнем возрасте отличались ценными показателями. Это позволило отселектировать отдельные экземпляры для вегетативного размножения и создания плантаций целевого назначения: по интенсивности роста и повышенной экологической эффективности. Отбор по данным показателям желательно проводить в более раннем возрасте, когда наблюдается наибольшая изменчивость по росту и формированию кроны.

Отселектированные по высоте, диаметру, протяженности кроны и длине хвои деревья могут служить маточными для выращивания посадочного материала с использованием экземпляров разного географического происхождения в данных условиях произрастания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Еремин Н.В., Бродников С.Н., Мифтахов Т.Ф., Мамаев А.А. Лесные культуры сосны кедровой сибирской в Среднем Поволжье: состояние и проблемы // Тр. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Технологическая. 2014. № 2. С. 14–18.

Eremine N.V., Brodnikov S.N., Miftakhov T.F., Mamaev A.A. Sylvicultures Siberian Stone Pine in Middle Volga Region: State and Problems. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnologicheskaya»* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series “Technological”, 2014, no. 2, pp. 14–18. (In Russ.).

2. Кузнецова Г.В. Рост, состояние и развитие кедровых сосен в географических культурах на юге Красноярского края // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. XXVII. № 1-2. С. 102–107.

Kuznetsova G.V. The State and Development of Siberian Pine Trees in Provenance Trial Plantations in the South of the Krasnoyarsk Territory. *Conifers of the boreal area*, 2010, vol. 27, no. 1-2, pp. 102–107. (In Russ.).

3. Левин С.В. Эколого-биологические особенности произрастания кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour.) в условиях интродукции Воронежской области // Бюл. гос. Никитск. ботанич. сада. 2022. № 144. С. 25–32.

Levin S.V. Ecological and Biological Characteristics of Siberian Cedar (*Pinus sibirica* Du Tour.) Growth under the Conditions of Introduction in Voronezh Region. *Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens*, 2022, no. 144, pp. 25–32. (In Russ.).

<https://doi.org/10.36305/0513-1634-2022-144-25-32>

4. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. Коллекция клонов, полусибов, разных морфологических форм кедра сибирского на плантации СибГУ (юг Средней Сибири). Красноярск: СибГУ, 2012. 47 с.

Matveeva R.N., Butorova O.F. *A Collection of Clones, Halfsibs and Different Morphological Forms of Siberian Pine on the Plantation of SibSTU (The South of Central Siberia)*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2012. 47 p. (In Russ.).

5. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Братилюва Н.П., Пастухова А.М., Водин А.В. Изменчивость, отбор потомства экотипов, плюсовых деревьев и формирование плантационных культур кедровых сосен в пригородной зоне г. Красноярска. Красноярск: СибГУ, 2006. 268 с.

Matveeva R.N., Butorova O.F., Bratilova N.P., Pastukhova A.M., Vodin A.V. *Variability, Selection of Ecotypes' Offspring, Plus Trees and Formation of Plantation Crops of Cedar Pines in the Suburban Area of Krasnoyarsk*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2006. 268 p. (In Russ.).

6. Митрофанов С.В. Культуры кедров сибирского в условиях лесостепи Южного Урала // Леса Евразии – Уральские горы: материалы V Междунар. конф. молодых ученых. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2005. С. 127–129.

Mitrofanov S.V. Siberian Cedar Pine Crops in the Conditions of the Forest-Steppe of the Southern Urals. *Forests of Eurasia – Ural Mountains: Proceedings of the 5th International Conference of Young Scientists*. Moscow, MGUL Publ., 2005, pp. 127–129. (In Russ.).

7. Наквасина Е.Н. Динамика рангового распределения деревьев по высоте в потомстве климатипов сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2002. № 5. С. 24–29.

Nakvasina E.N. Dynamics of Tree Growth Ranging in Climatype Posterity of Scots Pine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2002, no. 5, pp. 24–29. (In Russ.).

8. Пинаева Н.В. Статистический метод выделения лучших деревьев сосны кедровой сибирской в искусственных молодняках // Лесное хозяйство и зеленое строительство в Западной Сибири: материалы VIII Междунар. науч. интернет-конф. Томск: ТГУ, 2016. С. 127–131.

Pinaeva N.V. Statistical Method for Identifying the Growing-Stock Trees of Siberian Pine in Artificial Young Plantations. *Forestry and Sustainable Construction in Western Siberia: Proceedings of the 8th International Scientific Internet Conference*. Tomsk, TSU Publ., 2016, pp. 127–131. (In Russ.).

9. Садыков А.Р., Володькина О.А. Опыт выращивания кедров сибирского в условиях Среднего Поволжья // Проблемы и мониторинг природных экосистем: сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Пензенский ГАУ, 2015. С. 131–136.

Sadykov A.R., Volod'kina O.A. Experience of Siberian Pine Growing in the Middle Volga. *Problems and Monitoring of Natural Ecosystems: Collection of Academic Papers of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. Penza, PSAU Publ., 2015, pp. 131–136. (In Russ.).

10. Свалова А.И., Братилова Н.П. Рост сосны кедровой сибирской разного географического происхождения в условиях дендрария СИБГУ им. М.Ф. Решетнёва // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. 41, № 4. С. 271–276.

Svalova A.I., Bratilova N.P. The Growth of Siberian Cedar Pine of Different Geographical Origin in the Arboretum of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. *Conifers of the boreal area*, 2023, vol. 41, no. 4, pp. 271–276. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-4-271-276>

11. Семаев С.В. Географические культуры кедров сибирского в Дмитровском лесничестве Московской области // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2010. № 3. С. 132–133.

Semaev S.V. Geographical Species of a Siberian Cedar in the Dmitrov Forest District, Moscow Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2010, no. 3, pp. 132–133. (In Russ.).

12. Allen H.L., Fox Th.R., Campbell R.G. What is Ahead for Intensive Pine Plantation Silviculture in the South? *Southern Journal of Applied Forestry*, 2024, vol 29, iss. 2, pp. 62–69. <https://doi.org/10.1093/sjaf/29.2.62>

13. Danilov Yu.I., Guzyuk M.Ye, Fetisova A.A., Nikolaeva M.A. Analysis of the Preservation and Growth of Scots Pine in the Provenance Trials of Professor Vasily Ogievsky in Educational-Experimental Forestry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, art. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012054>

14. Duchesne I., Lenz P.R.N., Girardin M.P., Isabel N. Translocating Seed Sources to New Geoclimatic Environments Has Limited Effect on Lumber Quality of Eastern Canadian White Spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 52, iss. 12, pp. 1553–1565. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0075>

15. Etterson J.R., Cornett M.W., White M.A., Kavajecz L.C. Assisted Migration Across Fixed Seed Zones Detects Adaptation Lags in Two Major North American Tree Species. *Ecological Applications*, 2020, vol. 30, iss. 5, art. e02092. <https://doi.org/10.1002/eap.2092>

16. Navalikhin S., Shurygin S., Danilov Yu., Chikalyuk V., Fetisova A., Lugovoy Ph., Bacherikov I. The Growth of Geographical Crops of Scots Pine on Drained Lands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, iss. 1, art. 012093. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012093>

17. Neale D.B., Kremer A. Forest Tree Genomics: Growing Resources and Applications. *Nature Reviews Genetics*, 2011, vol. 12(2), pp. 111–122. <https://doi.org/10.1038/nrg2931>

18. Novikova T.N., Milyutin L.I. Variation in Certain Characters and Properties of Scotch Pine Needles in Geographic Cultures. *Russian Journal of Ecology*, 2006, vol. 37, pp. 90–96. <https://doi.org/10.1134/S1067413606020044>

19. Pautasso M. Geographical Genetics and the Conservation of Forest Trees. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2009, vol. 11, iss. 3, pp. 157–189. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2009.01.003>

20. Qin A., Ding Ya., Jian Z., Ma F., Worth J.R.P., Pei Sh., et al. Low Genetic Diversity and Population Differentiation in *Thuja sutchuenensis* Franch., an Extremely Endangered Rediscovered Conifer Species in Southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 2021, vol. 25, art. e01430. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01430>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*161

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-41-52

Ресурсы кедрового ореха в Ханты-Мансийском автономном округе

И.В. Предеина¹, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6806-8968>

А.Н. Гавриленко², аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3088-7020>

С.В. Залесов^{2✉}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410x),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410x>

¹Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, ул. Дунина-Горкавича, д. 1, г. Ханты-Мансийск, Россия, 628007; PredeinaIV@admhmao.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; lorba.les@gmail.com, zalesovsv@m.usfeu.ru✉

Поступила в редакцию 15.04.25 / Одобрена после рецензирования 06.07.25 / Принята к печати 09.07.25

Аннотация. Определены площади кедровых насаждений в лесах различных категорий Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Кедровые леса составляют 15 % покрытой лесной растительностью площади субъекта и расположены в основном в эксплуатационных лесах. Лишь небольшая часть кедровников (9,5 %) отнесена к защитным лесам. Проведена оценка орехопромысловых зон по основным параметрам: составу насаждений, бонитету, полноте, доле кедра в составе. Отмечается, что выделенные в 1954 г. орехопромысловые зоны в настоящее время во многом не соответствуют этому выделению по причине низкого класса бонитета, малой относительной полноты древостоев, а также незначительности доли кедровников в общей площади обозначенных зон. Так, при общей площади орехопромысловых зон в округе 307,5 тыс. га доля кедровых насаждений в них составляет 39 % (119,1 тыс. га). Две пятых территории орехопромысловых зон представлены нелесными землями и насаждениями других формаций: сосновой и еловой. Отмечается сокращение числа арендаторов при использовании лесов для заготовки пищевых лесных ресурсов: заготовку кедрового ореха сдерживает слабая освоенность территории лесного фонда дорожной сетью. В результате при биологической урожайности сосны кедровой сибирской 103 593,1 т фактически собирается 5,5 т. В целях увеличения потребления кедрового ореха необходимо пересмотреть площади орехопромысловых зон с учетом таксационных показателей насаждений, создать сеть дорог во вновь выделенных орехопромысловых зонах, осуществлять мониторинг урожайности сосны кедровой сибирской для планирования заготовки, разработать региональные рекомендации по сбору недревесной продукции леса.

Ключевые слова: Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, сосна кедровая сибирская, *Pinus sibirica* Du Tour, кедровник, орехопромысловые зоны, кедровый орех, урожайность сосны кедровой сибирской, недревесная продукция леса

Для цитирования: Предеина И.В., Гавриленко А.Н., Залесов С.В. Ресурсы кедрового ореха в Ханты-Мансийском автономном округе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 41–52. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-41-52>

Original article

The Pine Nut Resources in the Khanty-Mansi Autonomous Area

Irina V. Predeina¹, Candidate of Agriculture; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6806-8968>

Andrey N. Gavrilenko², Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3088-7020>

Sergei V. Zalesov^{2✉}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410x),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410x>

¹Department of Subsoil Use and Natural Resources of the Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, ul. Dunina-Gorkavicha, 1, Khanty-Mansiysk, Russia, 628007;

PredeinaIV@admhmao.ru

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, Russia, 620100; lorba.les@gmail.com, zalesovsv@m.usfeu.ru ✉

Received on April 15, 2025 / Approved after reviewing on July 6, 2025 / Accepted on July 9, 2025

Abstract. The paper shows the results of determination of the areas of Siberian pine plantations in forests of various categories of the Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra. Siberian pine forests represent up to 15 % of the region's forested area and are located mainly in commercial forests. Only a small part of them (9.5 %) is classified as protective forests. An assessment of nut harvesting sites was carried out by the main parameters: stand composition, quality classes, stand density, proportion of Siberian pine trees in the composition. We remark that the nut harvesting sites allocated in 1954 currently do not correspond to the allocations due to the low quality class, low relative density of tree stands, as well as the insignificant share of Siberian pine forests in the total area of the nut harvesting sites. Thus, with a total area of 307.5 thousand ha of the nut harvesting sites in the region, the share of Siberian pine plantations at these sites is 39 % (119.1 thousand ha). Two fifths of the area of the nut harvesting sites are represented by non-forest lands and plantations of other species: pine and spruce. A reduction in the number of lessees using forests for harvesting edible forest resources is noted. Pine nut harvesting is held back by the forest fund territory poor development in terms of road network. As a result, out of the Siberian pine biological yield being 103,593.1 t of nuts, only 5.5 t are actually collected. In order to increase the pine nut consumption, it is necessary to revise the areas of nut harvesting sites taking into account the actual inventory parameters of stands, to create a road network at the newly allocated nut harvesting sites, to monitor the Siberian pine yield for harvesting planning, and develop regional recommendations for the collection of non-wood forest products.

Keywords: Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, Siberian pine, *Pinus sibirica* Du Tour, Siberian pine forest, nut harvesting sites, pine nut, Siberian pine yield, non-wood forest products

For citation: Predeina I.V., Gavrilenko A.N., Zalesov S.V. The Pine Nut Resources in the Khanty-Mansi Autonomous Area. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 41–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-41-52>

Введение

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра входит в пятерку субъектов Российской Федерации, наиболее обеспеченных лесосырьевыми ресурсами. Общая площадь земель субъекта, на которых располагаются леса, состав-

ляет 50 336,1 тыс. га, или 4,4 % от общей площади лесов страны, в т. ч. земли, покрытые лесной растительностью, – 28 970,7 тыс. га, или 3,8 % от земель аналогичной категории в России [13].

Кедровые леса давно признаны визитной карточкой Югры [15, 17, 21]. Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) включена в символику герба округа. Эколого-биологические особенности вида и его значение в природе и жизни населения описаны в научной литературе [16, 20, 23, 24]. Достоинством кедровых лесов являются орехи. Их пищевая и лечебная ценность общеизвестна. Ядро содержит до 64 % жиров, 19 % азотистых веществ, 15 % углеводов и 2 % минеральных элементов [3, 4, 6, 10].

В Сибири сосна кедровая сибирская – единственная порода, дающая промышленно-значимые урожаи орехов. Заготовка кедрового ореха проводится в районах, где кедровые леса занимают более 5 % покрытой лесной растительностью площади, что обеспечивает относительную концентрацию кедровых массивов и организацию эффективного орехопромысла [2]. На территориях, где кедр составляет менее 5 % лесного фонда, увеличивается потребление ореха лесной фауной, а собранный орех используется на местные нужды [14].

Дикорастущие орехи стали пользоваться повышенным спросом на внутреннем рынке России в связи с сокращением импорта ореха в условиях санкций, спрос на данную продукцию существует и на внешнем рынке. Это определяет рост закупочных цен и стимулирует развитие таежных территорий. Не случайно предпринимаются попытки увеличения площади кедровых насаждений [7, 18].

Интерес к данной породе существует не только в России, но и у китайских коллег. За устойчивость к холоду, способность расти на большой высоте сосну сибирскую кедровую выбрали для стратегического проекта по интродукции в северные части бореальных лесов Китая для улучшения структуры этих лесов и осуществления эксперимента по получению урожая кедровых орехов [22, 25].

В последние годы активно развивается заготовка и переработка дикорастущих плодов и ягод на Алтае, в Томской области, Республике Тыва, Приморском, Хабаровском и Красноярском краях. Вместе с тем реальный объем переработки дикоросов на сегодняшний день остается крайне низким. По экспертным оценкам, в стране используется не более 2,5 % биологического запаса лесных ягод, 4 % кедровых орехов и 7–8 % грибов [11, 12].

Так, в Югре кедровые леса занимают обширные территории, входящие в естественный ареал сосны сибирской кедровой. Однако лидером среди регионов Российской Федерации по заготовке кедрового ореха является Томская область, хотя площади кедровых лесов в этом регионе на 554,7 тыс. га меньше. 2021 и 2022 гг. в автономном округе были урожайными на кедровый орех и показали опасность неорганизованной и неумеренной заготовки этого плода с нарушением сроков и технологий сбора. Припоселковые кедровники подверглись активной нагрузке, при этом огромные территории оказались не охвачены сбором.

Цель работы – на основе анализа лесного фонда разработать предложения по увеличению объемов заготовки кедрового ореха в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре.

Объекты и методы исследования

С целью прижизненного использования отличающихся высокой семенной продуктивностью насаждений сосны кедровой сибирской в 60-е гг. прошлого века работниками региональных управлений лесами по материалам лесоустройства были выделены орехопромысловые зоны. Так, орехопромысловые зоны Ханты-Мансийского автономного округа – Югры утверждены постановлением Совмина РСФСР №1281 от 11.08.1954 г., которое остается действующим нормативным документом.

В соответствии с лесоустроительной инструкцией, введенной приказом Минприроды России от 05.08.2022 г. № 510, проектирование лесов, расположенных в ореховопромысловых зонах, осуществляется с учетом границ земель, на которых произрастают леса, ранее отнесенные к орехопромысловым зонам. Другими словами, границы орехопромысловых зон не корректируются, также отсутствует научно-обоснованный механизм включения в них новых насаждений сосны кедровой сибирской. Эта же проблема выявлена для орехопромысловых зон Томской области [8]. Предложения по инвентаризации таких лесов и пересмотру порядка организации работ в них вносились рядом авторов [5, 19].

Для оценки ресурсов кедрового ореха проведен сравнительный анализ материалов лесоустройства, данных Государственного лесного реестра по лесному фонду Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на ключевых участках, других ведомственных материалов и литературных источников.

Особенности породной, возрастной, типологической и других структур орехопромысловых зон были изучены на примере территорий, расположенных в Северо-Уральском таежном лесном районе – Березовское лесничество, в Западно-Сибирском северо-таежном равнинном лесном районе – Мегионское, Сургутское и Самаровское лесничества, в Западно-Сибирском средне-таежном лесном районе – Нефтеюганское и Юганское лесничества.

Результаты исследования и их обсуждение

Насаждения с участием сосны кедровой сибирской составляют 15 % общей покрытой лесной растительностью площади, или 4217,6 тыс. га, и занимают 2-е место по распространению среди хвойных пород, отдавая первенство сосновым насаждениям – 53 % (14 960,4 тыс. га), на еловые насаждения приходится 9 % (2510,1 тыс. га), а на лиственничные и пихтовые – чуть более 2 % площади (653,8 и 84,8 тыс. га соответственно).

Несмотря на исключительную хозяйственную и средообразующую ценность насаждений сосны кедровой сибирской, их подавляющая часть размещена в эксплуатационных лесах (90,5 %), на долю кедровников защитного назначения приходится лишь 9,5 % их общей площади.

Чуть меньше 1/2 (180,8 тыс. га) защитных лесов сосны кедровой сибирской сосредоточено в запретных полосах лесов вдоль водных объектов. К орехопромысловым зонам насаждений сосны кедровой сибирской относится только 2,8 % от общей площади кедровников округа (табл. 1).

Таблица 1

Распределение площади кедровников Ханты-Мансийского автономного округа – Югры по категориям лесов
Distribution of the Siberian pine forests area of the Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra by the forest categories

Категория лесов	Площадь, тыс. га	Доля от площади автономного округа, %
1. Защитные леса	402,4	9,5
1.1 Леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов, в т. ч.:	22,3	0,5
защитные полосы лесов, расположенные вдоль дорог	11,5	0,3
зеленые зоны	10,5	0,2
лесопарковые зоны	0,3	0
1.2. Ценные леса, в т. ч.:	380,1	9,0
орехопромысловые зоны	119,1	2,8
запретные полосы лесов, расположенные вдоль водных объектов	180,8	4,3
нерестоохранные полосы лесов	80,2	1,9
2. Эксплуатационные леса	3815,2	90,5

Распределение насаждений сосны кедровой сибирской по лесничествам приведено в табл. 2.

Таблица 2

Орехопромысловые зоны Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в разрезе лесничеств
The nut harvesting sites of the Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra by the forestries

Лесничество	Орехопромысловая зона			Кедровые насаждения	
	общая площадь, тыс. га	в т. ч. кедровых насаждений, тыс. га	доля кедровых насаждений, %	площадь, тыс. га	доля от общей площади кедровых лесов в автономном округе, %
Аганское	0	0	0	291,76	6,92
Белоярское	0	0	0	199,59	4,73
Березовское	34,54	18,19	54,7	704,92	16,71
Кондинское	0	0	0	35,14	0,83
Мегионское	54,23	20,48	37,8	422,43	10,02
Нефтеюганское	46,57	11,41	24,5	203,70	4,83
Нижневартовское	87,57	31,60	36,1	694,72	16,47
Няксимвольское	0,19	0,19	100	347,96	8,25
Октябрьское	2,20	1,46	66,4	285,52	6,77
Самаровское	58,53	24,69	42,2	227,84	5,40
Советское	0	0	0	186,69	4,43
Сургутское	0,16	0,15	93,8	140,18	3,32
Урайское	0	0	0	68,49	1,62
Юганское	22,57	6,84	30,3	393,83	9,34
Всего	307,50	119,10	39,0	4217,60	100

Материалы табл. 2 свидетельствуют, что площадь орехопромысловых зон в округе составляет 307,5 тыс. га, из них покрытых лесом 226,9 тыс. га. (74 %), а кедровых насаждений – 119,1 тыс. га (39 %). Орехопромысловые зоны выделены в 9 лесничествах. Большие площади представлены в Нижневартовском, Самаровском, Мегионском и Нефтеюганском лесничествах – более 40 тыс. га в каждом из них.

На 82 % орехопромысловые зоны состоят из насаждений естественного происхождения, остальные площади приходятся на болота (14 %), гари (3 %), водные объекты и объекты инфраструктуры (1 %).

В 5 лесничествах (Мегионское, Нефтеюганское, Нижневартовское, Самаровское, Юганское) кедровые насаждения составляют меньше 1/2 от площади, выделенной под зону орехопромысла.

Средние таксационные характеристики орехопромысловых зон в ключевых лесничествах сведены в табл. 3.

Таблица 3

Таксационные характеристики насаждений орехопромысловых зон ключевых лесничеств Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
Inventory parameters of the nut harvesting site stands of the key forestries of the Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra

Лесничество	Площадь ключевого участка орехопромысловой зоны, тыс. га	Участие кедра в составе, ед.	Средний возраст, лет	Средний класс бонитета	Средняя полнота	Преобладающий тип леса
Березовское	34,54	7–8	150	V	0,4	ОССФ
Мегионское	54,23	5–6	195	V	0,5	ДМХВ
Самаровское	58,53	3–4	165	IV	0,5	ЗММТ
Сургутское	0,16	7–8	150	IV	0,7	ЗМЯГ
Нефтеюганское	46,57	3–4	150	IV	0,5	ЗМЯГ
Юганское	22,57	5–6	230	IV	0,6	ЗМЯГ

Примечание: ОССФ – осоко-сфагновый тип леса; ДМХВ – долгомошно-хвощевый; ЗММТ – зеленомошно-мелкотравный; ЗМЯГ – зеленомошно-ягодниковый.

Анализ структуры орехопромысловых зон ключевых лесничеств Ханты-Мансийского автономного округа – Югры показал, что 39 % территории представлено нелесными землями и насаждениями других формаций, в основном это сосновая, березовая и еловая формации. Сосняки относятся к осоко-сфагновым типам леса и имеют возраст 150–160 лет, Va,б классы бонитета, полноту 0,4–0,5. Березняки – к зеленомошниковой группе типов леса, полнота – 0,6–0,7, возраст – 20–25 лет. Ельники – к зеленомошно-мелкотравному типу леса, полнота – 0,5, возраст – 160–170 лет, IV класс бонитета. Подрост сосны сибирской кедровой представлен во всех формациях [1].

Кедровники относятся к зеленомошной и долгомошно-хвощевой группам типов леса, характеризуются V классом бонитета, полнотой 0,5 и возрастом 170–230 лет (табл. 4).

Таблица 4

**Участие кедровых насаждений различных характеристик
в орехопромысловых зонах, %**
Siberian pine stands with various parameters at the nut harvesting sites, %

Лесничество	Кедровые насаждения в общей площади зоны	Насаждения кедра V–Va,б классов бонитета	Кедровые насаждения полнотой 0,3–0,4	Кедровые насаждения с <4 ед. кедра в составе
Березовское	54,7	93,5	60,9	8,2
Мегионское	37,8	66,9	37,8	22,8
Нефтеюганское	24,5	37,9	18,6	32,4
Самаровское	42,2	32,1	25,8	31,9
Сургутское	93,8	8,6	12,2	–
Юганское	30,3	17,9	5,6	9,5

Для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры разработаны рекомендации по выделению орехопромысловых зон («Положение о ведении хозяйства в кедровых лесах ХМАО–Югры» [9]). Согласно данным рекомендациям, неперспективными считаются участки со следующими параметрами:

- доля кедровников в общей площади участка менее 25 %;
- доля насаждений кедра V–Va,б классов бонитета превышает 50 % от площади кедровников;
- доля кедровых насаждений с полнотой 0,3–0,4 более 50 % от площади кедровников;
- площадь кедровников, имеющих в составе менее 4 ед. кедра, превышает 50 %;
- площадь спелых и перестойных кедровников (старше 240 лет) превосходит 50 %;

При этом минимальная орехопродуктивность кедровников, пригодная для промышленного использования, согласно положению, равна 50 кг/га, а доля хозяйственно возможного сбора ореха – 50 %.

Анализ некоторых параметров орехопромысловых зон по ключевым лесничествам (см. табл. 4) позволяет отметить, что в 3 из 6 лесничеств зоны не отвечают требованиям 1–2 параметров. Так, в орехопромысловой зоне Березовского лесничества доля насаждений кедра V–Va,б классов бонитета составляет более 93 %, а низкополнотных кедровников – 60,9 %, что может свидетельствовать о низком качестве древостоя и его слабой урожайности. В Мегионском лесничестве также наблюдается значительное число низкобонитетных насаждений (66,9 %). В Нефтеюганском лесничестве выявлено небольшое участие кедровников в общей площади зон – 24,5 % от 46,57 тыс. га, что опровергает эффективность выделения данной категории лесов в настоящих границах.

Приведенные данные об орехопромысловых зонах свидетельствуют о необходимости пересмотра их границ.

Возможный объем заготовки кедрового ореха по автономному округу составляет 103 593,1 т, а фактически используется около 5,5 т. Сбор ореха в округе незначителен и осуществляется главным образом населением для

собственных нужд и малыми предприятиями, а в промышленных масштабах почти не ведется.

По состоянию на 01.01.2024, согласно форме отчетности 6-ОИП «Сведения об использовании лесных участков, предоставленных в аренду, постоянное (бессрочное) пользование и безвозмездное пользование, сервитут», на основании договоров аренды лесных участков для заготовки пищевых лесных ресурсов и сбора лекарственных растений выделено 704,3216 га земель лесного фонда. Согласно данным Лесного плана 2019 г., на 01.01.2017 в аренде под данный вид использования было 3677,01 га. Размер арендуемых площадей сократился в 5 раз (табл. 5).

Таблица 5

**Использование участков для заготовки пищевых лесных ресурсов
и сбора лекарственных растений**
**The sites' use for harvesting edible forest resources
and gathering medicinal plants**

Лесничество	Количество договоров аренды, шт.	Используемая площадь, га
Белоярское	5	182,2
Березовское	1	21,1
Кондинское	3	75,5
Нефтеюганское	2	50,0
Нижневартовское	1	7,7
Самаровское	10	296,0
Советское	1	10,0
Сургутское	1	61,9

Возможными причинами незначительности территорий, используемых для заготовки ореха, послужили: периодичность урожайности кедра, сложность исполнения договорных обязательств по разработке проекта освоения лесов, подаче лесных деклараций и отчетностей, удаленность участков от точек переработки дикоросов.

Наличие развитой дорожной сети круглогодичного действия способно обеспечить высокую эффективность деятельности всего лесного сектора автономного округа. В настоящее время отсутствие лесовозных дорог является основным сдерживающим фактором развития как лесозаготовок, так и сбора дикоросов в лесу.

Многолетней практикой и нормами технологического проектирования установлено, что для организации регулярного лесопользования и ведения лесного хозяйства, рационального применения лесосырьевых запасов плотность лесных дорог должна составлять на 1000 га лесной площади:

- магистралей лесовозных дорог с твердым или переходным типом покрытия – 1,0–1,2 км;
- лесовозные ветки с переходным типом покрытия – 6–7 км;
- временные лесовозные дороги (усы, зимники) – 12–14 км.

Данные о протяженности дорог на 01.01.2016 получены на основе Лесного плана Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (табл. 6).

Таблица 6

**Фактическая протяженность дорог по лесничествам
и административным районам, км**
The actual roads' length in the forestries and administrative districts, km

Муниципальный район	Лесничество	Протяженность дорог		Итого	Протяженность дорог на 1000 га
		общего пользования	в лесном фонде		
Белоярский	Белоярское	155,56	232,4	387,96	0,08
Березовский	Березовское	0	371,9	371,90	0
	Няксимвольское	108,47	697,7	806,17	0,1
Октябрьский	Октябрьское	356,18	1237,4	1593,58	0,8
Советский	Советское	291,33	6823,0	7114,33	2,5
Кондинский	Кондинское	35,50	1567,0	1602,50	0
	Урайское	260,34	1339,4	1599,74	0
Сургутский	Сургутское	574,60	2716,2	3290,80	0,3
	Юганское	0	146,2	146,20	0
Нижневартовский	Аганское	45,27	307,0	352,27	0
	Нижневартовское	311,72	299,2	610,92	0
	Мегионское	111,31	425,3	536,61	0
Ханты-Мансийский	Самаровское	316,19	1295,3	1611,49	0,3
Нефтеюганский	Нефтеюганское	166,75	554,9	721,65	0,3
Всего		2733,21	18 012,9	20 746,11	0,4

Из табл. 6 следует, что развитие дорожной сети в округе слабое. Расширение транспортной доступности происходит лишь за счет нефтегазовых компаний, решающих свои задачи по обеспечению функционирования принадлежащих им объектов. С учетом отнесенности орехопромысловых зон к защитным лесам и ограниченности строительства здесь некоторых объектов, проблема доступности этих территорий будет актуальна и в будущем.

Выводы

1. Анализ современного состояния орехопромысловых зон Ханты-Мансийского автономного округа – Югры показывает неоднородность их структуры, 18 % территории относится к нелесным и непокрытым лесом землям. Кедровые насаждения занимают 39 % общей площади зон, при этом остальная часть представлена насаждениями сосновой, березовой и еловой формаций.
2. Существующие зоны не отвечают требованиям по некоторым параметрам и имеют высокую долю кедровых насаждений с низкими классом бонитета и полнотой, что не обеспечивает для этих зон целевой статус.
3. В автономном округе слабо развита система долгосрочной аренды участков с целью использования лесов под заготовку пищевых лесных ресурсов, что связано со слабой доступностью территории, удаленностью промысловых угодий от перерабатывающих станций.
4. Постановление Совмина РСФСР № 1281 от 11.08.1954 о выделении орехопромысловых зон в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре требует корректировки с целью уточнения границ зон с добавлением существую-

щих высокопродуктивных и потенциальных кедровников, а также исключения низкобонитетных и низкополнотных насаждений кедра и насаждений других формаций.

5. Заслуживает внимания разработка региональных рекомендаций по осуществлению заготовки недревесной продукции леса, в т. ч. определение допустимого неистощительного использования кедровников в орехопромысловых зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безденежных И.В., Башегуров К.А., Гавриленко А.Н., Залесов С.В., Данчева А.В. Обеспеченность подростом сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.) спелых и перестойных хвойных насаждений подзоны северной тайги // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. Вып. 3(141). Порядковый номер 80. Режим доступа: <https://research-journal.org/archive/3-141-2024-march/10.23670/TRJ.2024.141.35> (дата обращения: 26.03.26).

Bezdenezhnikh I.V., Bashegurov K.A., Gavrilenko A.N., Zalesov S.V., Dancheva A.V. Supply of Siberian Pine (*Pinus sibirica* Du Tour.) Undergrowth in Mature and Overmature Coniferous Stands in the Northern Taiga Subzone. *International Scientific Research Journal*, 2024, no. 3, art. 80. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/TRJ.2024.141.35>

2. Бех И.А. Перспективы освоения ресурсов кедрового ореха в лесах Сибири // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер.: Биология. 2008. Т. 1, № 4. С. 414–421.

Bekh I.A. Prospects for the Development of Pine Nut Resources in the Forests of Siberia. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Biology*, 2008, vol. 1, no. 4, pp. 414–421. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0261>

3. Воробьев В.Н., Руш В.А. Биохимический состав семян подсоченных деревьев кедра сибирского // Биология семенного размножения хвойных в Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 171–180.

Vorob'yev V.N., Rush V.A. Biochemical Composition of Seeds of Tapped Siberian Pine Trees. *Biology of Seed Reproduction of Conifers in Western Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, pp. 171–180. (In Russ.).

4. Годовалов Г.А., Залесов С.В., Коростелев А.С. Недревесная продукция леса. М.: Юрайт, 2018. 351 с.

Godovalov G.A., Zalesov S.V., Korostelev A.S. *Non-Wood Forest Products*. Moscow, Urait Publ., 2018. 351 p. (In Russ.).

5. Данченко А.М., Бех И.А., Вайшля О.Б. Инновации в современном лесном хозяйстве Томской области // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2010. № 4(12). С. 81–89.

Danchenko A.M., Bekh I.A., Vaishlya O.B. Innovations in Modern Forestry of the Tomsk Region. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2010, no. 4(12), pp. 81–89. (In Russ.).

6. Данченко А.М., Данченко М.А., Мясников А.Г., Бех И.А. Кедр России: моногр. Томск: Томск. гос. ун-т, 2016. 300 с.

Danchenko A.M., Danchenko M.A., Myasnikov A.G., Bekh I.A. *Siberian Pines of Russia*. Tomsk, TSU Publ., 2016. 300 p. (In Russ.).

7. Дебков Н.М. Припоселковые кедровники юга Западно-Сибирской равнины: история и современное состояние, рекомендации по устойчивому управлению (на примере Томской области). М.: Всемирн. фонд дикой природы, 2014. 52 с.

Debkov N.M. *Near-Village Siberian Pine Forests in the South of the West Siberian Plain: History and Current State, Recommendations for Sustainable Management (Case Study of the Tomsk Region)*. Moscow, WWF Publ., 2014. 52 p. (In Russ.).

8. Дебков Н.М., Залесов С.В., Оплетев А.С. Орехово-промысловые зоны и их современное состояние (на примере Томской области) // Лесн. вестн. 2016. Т. 20, № 6. С. 22–31.

Debkov N.M., Zalesov S.V., Opletaev A.S. Nut-Business Zones and Their Up-to-Date State (On the Example of the Tomsk Region). *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 6, pp. 22–31. (In Russ.).

9. Залесов С.В., Чижов Б.Е. Положение о ведении лесного хозяйства в кедровых лесах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Екатеринбург, 2012. 71 с.

Zalesov S.V., Chizhov B.E. *Regulations on Forestry in Siberian Pine Forests of Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra*. Yekaterinburg, 2012. 71 p. (In Russ.).

10. Коростелев А.С., Залесов С.В., Годовалов Г.А. Недревесная продукция леса. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2010. 480 с.

Korostelev A.S., Zalesov S.V., Godovalov G.A. *Non-Wood Forest Products*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2010. 480 p. (In Russ.).

11. Мартынюк А.А., Курлович Л.Е., Трушина И.Г., Трушина Н.И. Лесные дикоросы – ресурсы, использование и нормативное правовое регламентирование: аналитический обзор // Лесохоз. информ. 2023. № 4. С. 117–165.

Martynyuk A.A., Kurlovich L.E., Trushina I.G., Trushina N.I. Wild Non-Wood Forest Products – Resources, Use and Legal Regulation: Analytical Review. *Forestry information*, 2023, no. 4, pp. 117–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHL.2304-3083.2023.4.11>

12. Нагимов З.Я., Бартыш А.А., Суслов А.В., Онучин И.Е., Нагимов В.З. Ресурсы кедрового ореха в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре // Аграрн. вестн. Урала. 2014. № 6(124). С. 63–67.

Nagimov Z.Y., Bartysh A.A., Syslov A.V., Onuchin I.E., Nagimov V.Z. Resources of Nut Pine Forests in Khanty-Mansi Autonomous Area. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2014, no. 6(124), pp. 63–67. (In Russ.).

13. Открытые данные Федерального агентства лесного хозяйства / Сведения о землях лесного фонда на 01.01.2023 г. Режим доступа: <https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-ForestFund> (дата обращения: 26.03.26).

Open Data of the Federal Forestry Agency. Information on the Forest Fund Lands as of January 1, 2023. (In Russ.).

14. Реймерс Н.Ф. Роль кедровки и мышевидных грызунов в кедровых лесах Южного Приобья // Бюл. Моск. общ-ва испыт. природы. Отд. биол. 1956. Т. 61, вып. 2. С. 35–39.

Reymers N.F. The Role of Nutcracker and Mouse-Like Rodents in Siberian Pine Forests of the Southern Ob Region. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series*, 1956, vol. 61, iss. 2, pp. 35–39. (In Russ.).

15. Седых В.Н. Динамика равнинных кедровых лесов Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с.

Sedykh V.N. *Dynamics of Plain Siberian Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014. 232 p. (In Russ.).

16. Смолоногов Е.П., Залесов С.В. Эколого-лесоводственные основы организации и ведения хозяйства в кедровых лесах Урала и Западно-Сибирской равнины. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. 186 с.

Smolonogov E.P., Zalesov S.V. *Ecological and Forestry Basis of Organization and Management in Siberian Pine Forests of the Urals and the West Siberian Plain*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2002. 186 p. (In Russ.).

17. Чижов Б.Е., Бех И.А. Кедровые леса Западно-Сибирской равнины, хозяйство в них. Пушкино: ВНИИЛМ, 2014. 164 с.

Chizhov B.E., Bekh I.A. *Siberian Pine Forests of the West Siberian Plain and Their Management*. Pushkino, VNIILM Publ., 2014. 164 p. (In Russ.).

18. Чижов Б.Е., Кулясова О.А. К вопросу об ускоренном формировании целевых насаждений сосны кедровой на зонально-типологической основе в Западной Сибири // Лесохоз. информ. 2018. № 1. С. 31–40.

Chizhov B.E., Kulyasova O.A. To Question of Accelerated Formation in the Western Siberia of Target Designs of the Cedar Pine Forests on the Zonal-Typological Basis. *Forestry information*, 2018, no. 1, pp. 31–40. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.03>

19. Чижов Б.Е., Маленко А.А., Желдак В.И., Сидоренков В.М. Лесоводственные и экологические проблемы равнинных кедровых лесов Западной Сибири // Вестн. Алтайск. гос. аграрн. ун-та. 2015. № 3(125). С. 50–55.

Chizhov B.Ye., Malenko A.A., Zheldak V.I., Sidorenkov V.M. Silvicultural and Ecological Problems of Plain Cedar Forests of West Siberia. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2015, no. 3(125), pp. 50–55. (In Russ.).

20. Eberhard J. Zur Frage der Nature verjungung von *Pinus cembra* ssp. *sibirica* in der unteren Bergzone des Altai im Gebiet des Telezkev sees. *Arch. Forstwesen*, 1966, Bd. 15, Ht. 4, S. 180. (In German).

21. Farjon A. *Handbook of the Worlds Conifers*. Leiden-Boston, Brill, 2010, vol. II. 1111 p. <https://doi.org/10.1163/9789047430629>

22. Liu G., Yang C., Zhao G. Feasibility to Introduce Rare Tree Species *Pinus sibirica* into China. *Ying Yong Sheng tai xue bao* = The Journal of Applied Ecology, 2002, vol. 13(11), pp. 1483–1486. (In Chinese).

23. Pravdin L.F., Iroshnikov A.I. Genetics of *Pinus sibirica* Du Tour, *P. koraiensis* Sieb. et Zucc. and *P. pumila* Regel. *Annales Forestales*, 1982, no. 9/3, pp. 79–122.

24. Richardson D.M. *Ecology and Biogeography of Pinus*. Cambridge, Cambridge University Press, 1998. 527 p.

25. Shah S., Yu J., Liu Q., Shi J., Ahmad A., Khan D., et al. Climate Growth Response of *Pinus sibirica* (Siberian Pine) in the Altai Mountains, Northwestern China. *Pakistan Journal of Botany*, 2020, vol. 52, no. 2, pp. 593–600. [https://doi.org/10.30848/PJB2020-2\(16\)](https://doi.org/10.30848/PJB2020-2(16))

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

Научная статья

УДК 630:632*51:632*954

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-53-67

Биологическая и экономическая эффективность применения гербицидов способом инъекции при проведении ухода за молодняками

А.М. Постников[✉], канд. с.-х. наук; ResearcherID: [G-4313-2015](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8942-8155>

А.Б. Егоров, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [G-4300-2015](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2624-214X>

А.А. Бубнов, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [E-1666-2015](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5716-3503>

Л.Н. Павлюченкова, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [G-4285-2015](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-2496>

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Институтский просп., д. 21, Санкт-Петербург, Россия, 194021; a.postnikov@spb-niilh.ru[✉], herb.egorov@yandex.ru, a.bubnov@list.ru, pavlyuchenkova@spb-niilh.ru

Поступила в редакцию 03.04.25 / Одобрена после рецензирования 24.06.25 / Принята к печати 26.06.25

Аннотация. Из-за несвоевременного проведения ухода и их низкого качества значительные площади лесного фонда заняты смешанными древостоями разного происхождения. Для формирования хвойных насаждений с незначительной примесью лиственных пород требуется изменение их видового состава и густоты. Осуществление рубок ухода (прочистки и прореживания) характеризуется высокой стоимостью и трудоемкостью. Самым перспективным вариантом устранения конкуренции со стороны лиственных пород в смешанных насаждениях является инъекция гербицидов в стволы нежелательных лиственных деревьев. Эта технология сочетает высокую лесоводственную и экономическую эффективность с экологической безопасностью. Рекомендации по проведению инъекций гербицидов не обновлялись более 3 десятилетий и требуют существенной корректировки. Цель работы состояла в совершенствовании регулирования состава и густоты древостоев способом инъекции гербицидов и их смесей в стволы деревьев лиственных пород при снижении химической и токсической нагрузки на лесные экосистемы. Объектами исследования являлись отдельные деревья ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench) и осины (*Populus tremula* L.) вегетативного происхождения в фазе жердняка в смешанных насаждениях. Выявлено эффективное действие препарата Торнадо и его смеси с Арбоналом в низких дозах на ольху и осину при полном подавлении их вегетативной способности. Арбонал действовал медленнее, чем Торнадо, однако демонстрировал высокую результативность в следующем после проведения обработки вегетационном сезоне. Полученные данные свидетельствуют о перспективности рекомендуемых вариантов применения гербицидов для подавления лиственных пород, распространенных в таежной зоне. Оценка экономической эффективности метода показала, что общие финансовые затраты в 16–21 раз ниже по сравнению с базовой технологией с использованием механических средств устранения нежелательной растительности.

Ключевые слова: гербициды, инъекция гербицидов, осина, *Populus tremula* L., ольха серая, *Alnus incana* (L.) Moench, уход за лесом, прореживание, осветление, прочистка, нежелательная лиственная растительность, угнетение лиственными породами

© Постников А.М., Егоров А.Б., Бубнов А.А., Павлюченкова Л.Н., 2026



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

Благодарности: Исследование осуществлялось за счет средств Федерального агентства лесного хозяйства по госзаданию ФБУ «СПбНИИЛХ», № 053-00006-22-00 от 23.12.2021.

Для цитирования: Постников А.М., Егоров А.Б., Бубнов А.А., Павлюченкова Л.Н. Биологическая и экономическая эффективность применения гербицидов способом инъекции при проведении уходов за молодняками // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 53–67. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-53-67>

Original article

Biological and Commercial Efficiency of Applying Herbicides via Injection During Young Growth Tending

Anton M. Postnikov[✉], *Candidate of Agriculture*; ResearcherID: [G-4313-2015](https://orcid.org/0000-0002-8942-8155),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8942-8155>

Alexander B. Egorov, *Doctor of Agriculture*; ResearcherID: [G-4300-2015](https://orcid.org/0000-0003-2624-214X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2624-214X>

Alexander A. Bubnov, *Candidate of Agriculture*; ResearcherID: [E-1666-2015](https://orcid.org/0000-0001-5716-3503),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5716-3503>

Lidiya N. Pavluchenkova, *Candidate of Agriculture*; ResearcherID: [G-4285-2015](https://orcid.org/0000-0001-8884-2496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-2496>

Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutskiy prosp., 21, Saint-Petersburg, Russia, 194021; a.postnikov@spb-niilh.ru[✉], herb.egorov@yandex.ru, a.bubnov@list.ru, l.pavlyuchenkova@spb-niilh.ru

Received on April 3, 2025 / Approved after reviewing on June 24, 2025 / Accepted on June 26, 2025

Abstract. Significant areas of the forest fund are occupied by mixed stands of different origins due to unseasonable tending and its low quality. In order to form coniferous stands with a slight admixture of deciduous trees, it is necessary to change their species composition and density. Carrying out thinning (release cuttings and forest clearings) requires significant costs and labor intensity. The most promising option for eliminating competition between deciduous trees in mixed stands is the herbicide injection into the trunks of undesirable deciduous trees. This technology combines high silvicultural and commercial efficiency with environmental safety. Guidelines for herbicide injection have not been updated for more than three decades and require significant adjustments. The research aimed at the regulation improvement of the forest stands composition and density by injecting herbicides and their mixtures into the trunks of deciduous trees while reducing the chemical and toxic load on forest ecosystems. Research objects were individual trees of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) and aspen (*Populus tremula* L.) of vegetative origin in the pole stage in mixed plantations. The studies revealed the effective action of the Tornado herbicide preparation and its mixture with the Arbonal herbicide in low doses on grey alder and aspen with complete suppression of their vegetative capacity. The Arbonal alone acted somewhat slower than the Tornado, but showed high efficiency in the vegetation season following the treatment. The data obtained indicate the prospects of the recommended options for the herbicides application to suppress deciduous species common for the taiga zone. Cost-effectiveness analysis of the proposed technology showed that the total financial costs are

16–21 times lower compared to the basic technology using mechanical means of eliminating undesirable vegetation.

Keywords: herbicides, herbicide injection, aspen, *Populus tremula* L., grey alder, *Alnus incana* (L.) Moench, forest tending, thinning, release cuttings, forest clearings, undesirable deciduous vegetation, suppression by deciduous species

Funding: The research was financially supported by the Federal Agency for Forestry within the state assignment of the Saint Petersburg Forestry Research Institute approved by the Order No. 053-00006-22-00 dated December 23, 2021.

For citation: Postnikov A.M., Egorov A.B., Bubnov A.A., Pavluchenkova L.N. Biological and Commercial Efficiency of Applying Herbicides via Injection During Young Growth Tending. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 53–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-53-67>

Введение

Недостаточная эффективность лесовосстановления в РФ преимущественно обусловлена дефицитом качественных мероприятий по уходу за лесом. Исторические данные по Европейскому Северу страны демонстрируют критическое состояние лесных культур: к 70–80-м гг. XX в. их площадь в возрасте 30 лет не превышала 4 млн/га, при этом значительная часть была угнетена лиственными породами (осиной, березой) из-за отсутствия уходов [9]. Исследования подтверждают, что недостаток ухода приводит к гибели 25 % культур к 10-летнему возрасту [6], а также к сокращению доли хвойных насаждений. Например, в Архангельской области за 1914–1988 гг. площади с преобладанием сосны снизились с 45 до 27 %, а в Вологодской области территории с преимущественным произрастанием хвойных пород уменьшились на 30 %, при этом 63 % вырубок заросли лиственными деревьями [9]. В настоящее время негативная динамика сохраняется – происходит накопление смешанных древостоев, где хвойные виды угнетены лиственными и занимают 2-й ярус, что требует регулирования состава и густоты насаждений [10, 13].

Существующие методы уходов (механическое удаление нежелательной растительности) не всегда удовлетворяют лесоводственным требованиям из-за низкой эффективности, краткосрочности действия, высокой трудоемкости и низкой избирательности. Например, механизированная очистка кулис не позволяет сохранить отдельные деревья, что усугубляет проблему сокращения биоразнообразия и продуктивности насаждений. Для более качественного ухода необходимо внедрение новых технологий, которые повысят лесоводственную и экономическую эффективность проводимых мероприятий. Среди современных методов борьбы с нежелательной древесно-кустарниковой растительностью перспективным является внутривидовое введение химических препаратов [2].

Метод доказал свою результативность в 2 аспектах: кратном росте лесоводственной эффективности и снижении финансовых затрат. Ранее было установлено, например, что при инъекциях препаратов трудозатраты ниже в 8 раз по сравнению с механическим удалением деревьев [12]. Способ технологически доступен. Кроме того, за счет применения низких доз химических веществ и введения их непосредственно в ствол дерева значительно увеличивается эко-

логическая безопасность в сопоставлении с опрыскиванием гербицидами. Исследования подтверждают, что инъекции в смешанных молодняках приводят к повышению прироста хвойных в 1,5–2 раза через 5 лет и более чем в 2 раза через 10 лет по сравнению с контролем [1, 4, 5, 12, 14].

Регулирование состава и густоты древостоев химическим способом (инъекции в стволы нежелательных древесных растений) получило широкое распространение в лесном хозяйстве многих стран, в частности, в США и Канаде, Англии, Австралии [15–22].

Безопасность метода для окружающей среды достигается также за счет замены высокотоксичных препаратов на соединения с низкой токсичностью, которые используются в минимальных дозировках [1, 3]. Современные разработки, включающие опрыскивание смесями гербицидов, способствуют снижению химического и токсического воздействия на экосистемы. Однако использование таких смесей для инъекций в стволы деревьев остается недостаточно изученным.

Изменение ассортимента гербицидов для инъекций направлено на повышение их эффективности, скорости воздействия и универсальности при одновременной минимизации расхода препаратов, которая достигается за счет снижения концентрации рабочих растворов и количества насечек. Приоритет отдается препаратам с лучшими характеристиками: малотоксичным и удобным в использовании.

Проведенные ранее исследования (2022–2023 гг.) позволили авторам определить наиболее перспективные для исследования гербициды, а также разработать предварительные регламенты применения отобранных препаратов [7, 8]. Перспективными для экспериментального изучения с целью регулирования состава и густоты древостоев можно считать 2 гербицида, зарегистрированные для применения в Российской Федерации [11]: Торнадо, водный раствор (360 г/л глифосата в виде изопропиламинной соли); Арбонал, водорастворимый концентрат (250 г/л имзапира) – а также их смеси.

Цель исследования – оценить возможность снижения доз гербицидов при инъекциях в стволы деревьев ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench) и осины (*Populus tremula* L.) в фазе жердняка без потери биологической и экономической эффективности метода.

Объекты и методы исследования

Опытные объекты находились в Гатчинском лесничестве (Ленинградская область), в Балтийско-Белозерском таежном районе. Для определения эффективности воздействия гербицидов использовались 2 критерия: соотношение отмерших и оставшихся листьев у обработанных, но сохранивших признаки жизнеспособности деревьев по отношению к контрольным (необработанным) и доля полностью погибших экземпляров от общего количества обработанных деревьев. Определение этих показателей проводилось глазомерно для каждого дерева.

В 2023–2024 гг. в смешанном 2-ярусном древостое, сформировавшемся на сплошной вырубке, было выполнено 4 опыта. Состав 1-го яруса 6Ос2Б2Ол_с+Ив, 2-го – 10Е. Средний диаметр осины – 9,8 см, березы – 10,6 см, ольхи – 9,6 см, ивы – 9,3 см. Наблюдалось критическое угнетение ели в усло-

виях плотного затенения, создаваемого кронами лиственных деревьев. Опыты закладывались в 2 этапа с интервалом в 1 месяц. Дозы гербицидов в ряде опытов дублировались.

В опыте 1 обработка деревьев ольхи проведена 14.06.2023. Схема опыта: Торнадо 0,20 мл/дерево (вариант 1); Торнадо 0,12 мл/дерево (2); Арбонал 0,08 мл/дерево (3); Арбонал 0,04 мл/дерево (4); Торнадо 0,12 мл/дерево + Арбонал 0,08 мл/дерево (5); Торнадо 0,12 мл/дерево + Арбонал 0,04 мл/дерево (6). Учеты проводились: 1-й – 11.07.2023; 2-й – 17.08.2023; 3-й – 12.09.2023; 4-й – 10.06.2024; 5-й – 28.08.2024.

В опыте 2 обработка осин и учеты осуществлены в даты, аналогичные опыту 1. Схема введения препаратов та же.

В опыте 3 ольха обработана 11.07.2023 с применением Торнадо 0,55 мл/дерево (1); Арбонала 0,02 мл/дерево (2); Торнадо 0,20 мл/дерево + Арбонал 0,04 мл/дерево (3); Торнадо 0,12 мл/дерево + Арбонал 0,02 мл/дерево (4). Даты учетов: 1-й – 17.08.2023; 2-й – 12.09.2023; 3-й – 10.06.2024; 4-й – 28.08.2024.

В опыте 4 обработка осины проведена в ту же дату, что и в опыте 3. Схема опыта: Торнадо 0,55 мл/дерево (1); Торнадо 0,20 мл/дерево + Арбонал 0,04 мл/дерево (2); Торнадо 0,12 мл/дерево + Арбонал 0,02 мл/дерево (3). Учеты осуществлены в те же даты, что и в опыте 3.

Инъекции растворов гербицидов в деревья проводили с применением аккумуляторной дрели и инъектора или медицинского шприца (рис. 1). Гербициды вводили в предварительно сделанное с помощью дрели отверстие диаметром 10 мм и глубиной 20 мм. Диаметр стволов деревьев составлял 6–15 см, что характерно для большинства смешанных древостоев в фазе жердняка. При толщине дерева более 12 см делали 2 отверстия. При проведении инъекции в каждое отверстие вводили 1 мл рабочего раствора, препарат предварительно разбавляли водой. В каждом варианте опыта было обработано по 25 деревьев.



Рис. 1. Инъекция гербицида в ствол дерева в одном из опытов

Fig. 1. Herbicide injection into a tree trunk in one of the experiments

В «Государственном каталоге...» рекомендованные нормы применения препарата Торнадо составляют 0,55–1,10 мл/дерево, Арбонала – 0,16–0,32 мл/дерево [11]. В проведенных опытах дозы гербицидов были снижены: Торнадо – 0,12–0,20 мл/дерево, Арбонал – 0,02–0,08 мл/дерево, такие же концентрации использованы в смесях гербицидов.

Для анализа экспериментальных данных выбран непараметрический критерий Краскела–Уоллиса, т. к. предварительная проверка распределения показателей с использованием критерия Колмогорова–Смирнова выявила отклонение от нормального распределения. Оценка статистической значимости различий между вариантами по динамике отмирания листьев выполнялась отдельно для каждого учета. Во всех опытах различия между вариантами достигли статистически значимого уровня ($p < 0,05$). Использован непараметрический статистический показатель H , измеряющий различие между средними рангами групп: чем выше H , тем больше различия между группами.

В опыте 1 для 1-го учета $H = 40,41$; для 2-го $H = 40,2$; для 3-го $H = 49,68$; для 4-го $H = 130,62$; для 5-го $H = 138,69$.

В опыте 2 $H = 45,88; 26,16; 15,49; 21,05$ и $30,62$ соответственно для 1–5-го учетов. Во всех случаях в опытах 1 и 2 $p < 0,01$.

В опыте 3 $H = 55,77; p < 0,01; H = 40,95; p < 0,01; H = 9,77; p < 0,02; H = 10,78; p < 0,013$ для 1-го, 2-го, 3-го и 4-го, 5-го учетов соответственно.

В опыте 4 $H = 42,14; p < 0,01; H = 44,66; p < 0,01; H = 41,09; p < 0,01; H = 42,77; p < 0,01$ для 1-го, 2-го, 3-го и 4-го, 5-го учетов соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

В опыте 1 через 27 дней после обработки максимальная доля отмерших листьев у ольхи зафиксирована в варианте, где применялся Торнадо в концентрации 0,20 мл/дерево – 11 % (рис. 2). Значительно более низкая степень повреждения обработанных деревьев отмечена в варианте 2 и в вариантах с применением смесей – 1,8–3,5 %. Арбонал на данном этапе не проявил видимого эффекта: отмерших деревьев не обнаружено ни в одном из вариантов.

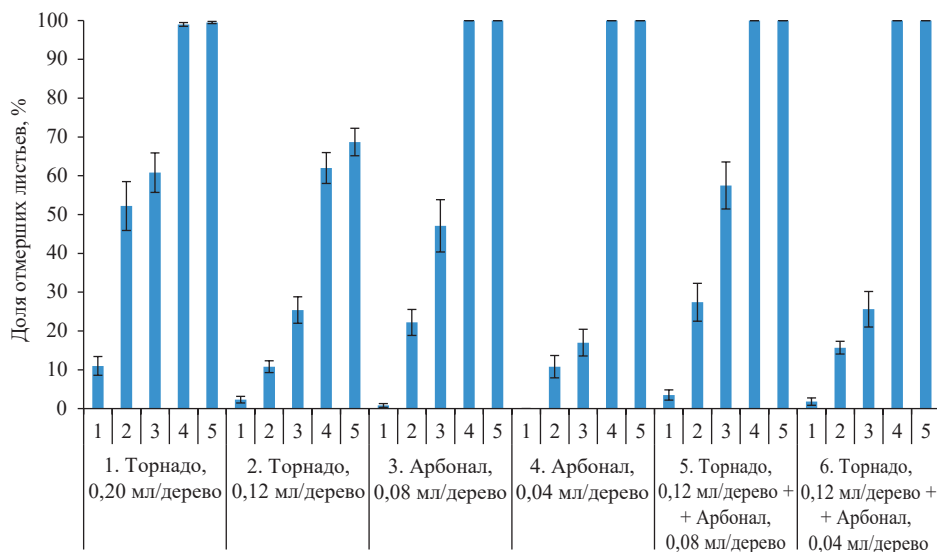


Рис. 2. Динамика отмирания листьев ольхи в опыте 1 с ошибкой (здесь и далее кроме вариантов, где погибло 100 % листьев). Здесь и на рис. 3–7, 9, 10 цифры на горизонтальной оси обозначают даты учета

Fig. 2. Dynamics of alder leaves dieback in experiment 1 with an error (here and further, except the variants where 100 % of leaves died). Here and in figures 3–7, 9, 10, the numbers on the horizontal axis indicate the measurement dates

Учет, проведенный через 64 дня после обработки, показал значительное увеличение доли отмерших листьев ольхи во всех вариантах. Наибольшая эффективность по-прежнему наблюдалась в варианте 1 – 52,2 %. В варианте 5 доля отмерших листьев повысилась более чем в 7 раз по сравнению с показателем 1-го учета и составила 27,4 %. Также более 22 % листьев погибло в варианте 3. Полностью усохшие деревья на данном этапе отмечены только в варианте 1 – 8 % (рис. 3).

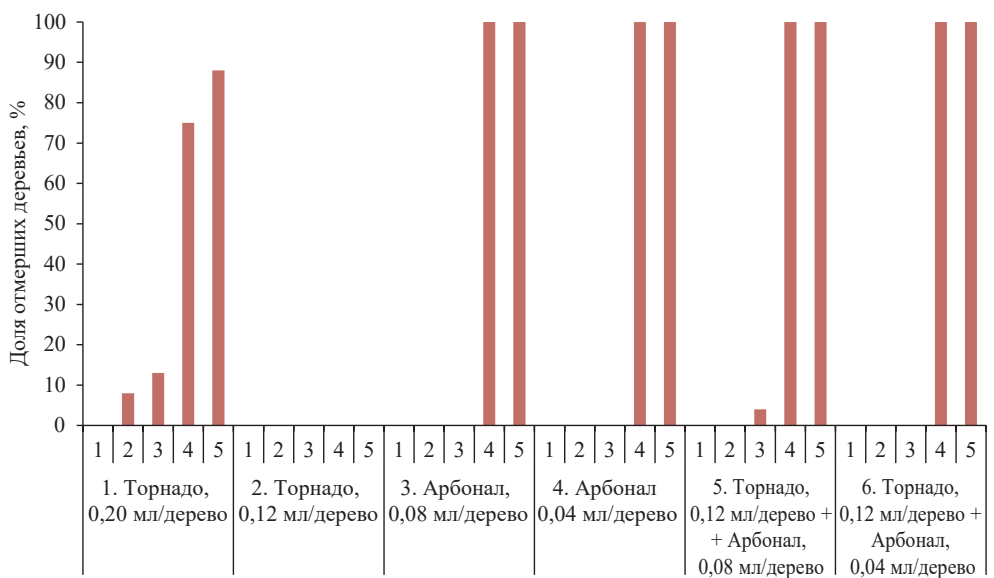


Рис. 3. Динамика отмирания деревьев ольхи в опыте 1

Fig. 3. Dynamics of alder trees dieback in experiment 1

Через 3 месяца после обработки наибольшая эффективность отмечена в варианте 1, где отмерло более 60 % листьев и 12 % деревьев ольхи. Также относительно высокая степень подавления наблюдалась в вариантах 3 и 5, где погибло 47,1 и 57,5 % листьев соответственно.

На следующий год после обработки во всех вариантах опыта отмечено существенное усиление эффективности действия гербицидов. В варианте 1 степень отмирания листьев достигала 99,5 %, погибло 75–88 % деревьев. В варианте 2 усыхания деревьев не зафиксировано, при этом доля отмерших листьев увеличилась до 62–68,7 %. В остальных вариантах опыта к этому сроку учета как листья, так и деревья усохли на 100 %.

В опыте 2 наиболее эффективным через 27 дней после обработки оказался вариант Торнадо 0,20 мл/дерево, в котором отмерло 46,5 % листьев и 8 % деревьев осины. Самая низкая эффективность в этот срок зафиксирована в вариантах с применением Арбонала (2,3–4,3 %).

Через 64 дня после обработки эффективность подавления осины выросла во всех вариантах (рис. 4). Наибольшая доля отмерших листьев (около 80 %) отмечена в вариантах 1 и 6, при этом в варианте 1 полностью погибло 70 % деревьев, а в варианте 6 – 30 %. В варианте 3 доля отмерших листьев выросла в 15 раз по сравнению с 1-м учетом при полной гибели 29 % деревьев (рис. 5).

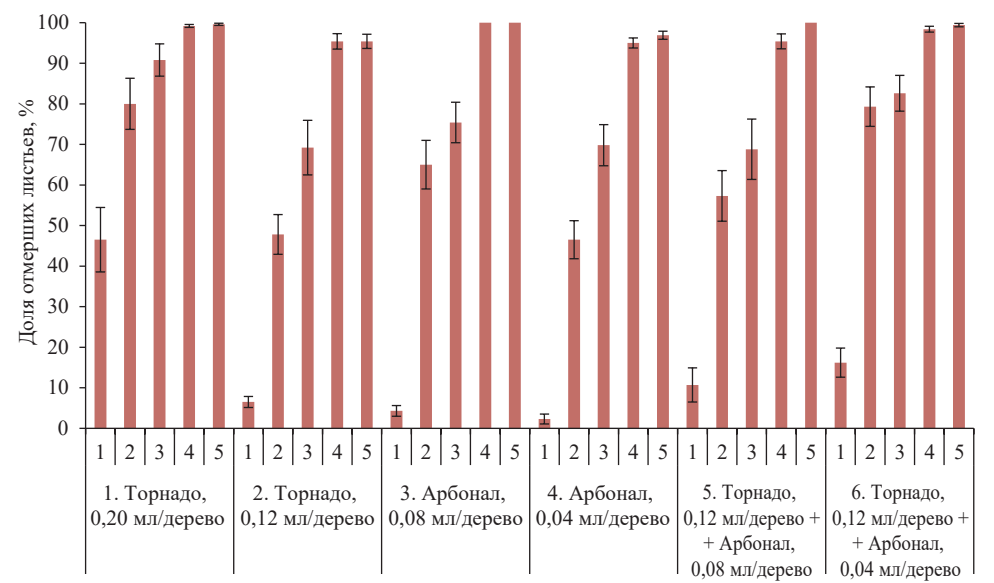


Рис. 4. Динамика отмирания листьев осины в опыте 2 с ошибкой (кроме вариантов, где погибло 100 % листьев)

Fig. 4. Dynamics of aspen leaves dieback in experiment 2 with an error (except the variants where 100 % of leaves died)

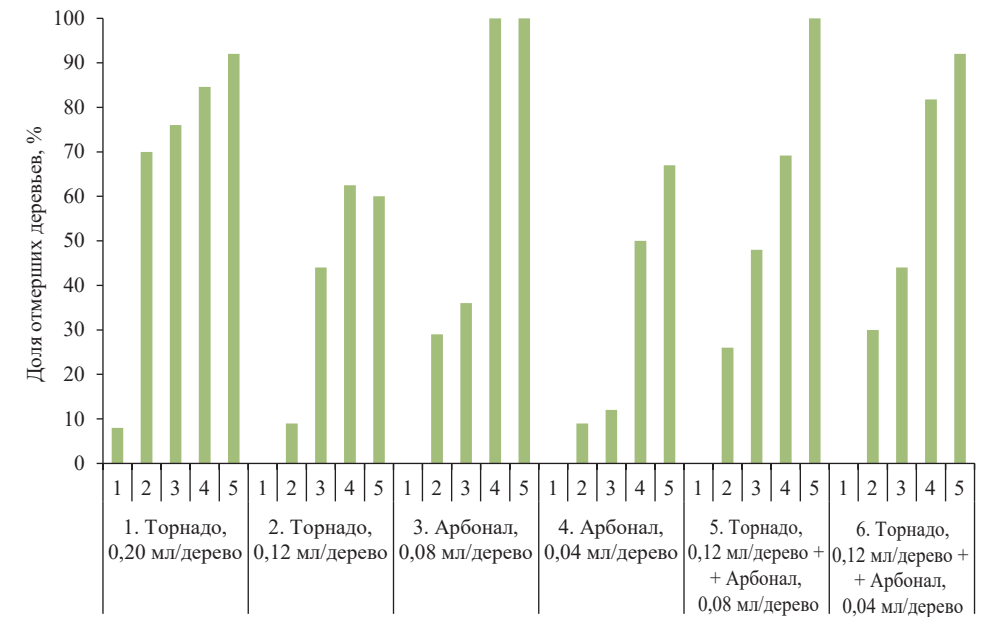


Рис. 5. Динамика отмирания осины в опыте 2

Fig. 5. Dynamics of aspen trees dieback in experiment 2

По результатам заключительного учета 2023 г. наибольшая эффективность подавления осины зафиксирована в варианте 1, отмерло более 90 % листьев и 76 % деревьев. Также высокая доля усохших листьев осины отмечена в варианте 6 – 82,6 %, однако доля отмерших деревьев в 1,7 раз меньше, чем в варианте 1. В остальных вариантах опыта на данном этапе была зафиксирована схожая степень подавления листьев.

На следующий после обработки год эффективность действия гербицидов во всех вариантах опыта значительно возросла. Максимальная степень отмирания листьев и деревьев (100 %) была достигнута в варианте 3 (рис. 6). Незначительно уступали показатели в варианте 5. Практически на одном уровне была эффективность в вариантах 1 и 6. В вариантах 2 и 4, несмотря на высокие показатели отмирания листьев (95–97 %), степень усыхания деревьев не превышала 67 %, что недостаточно для достижения нужного лесоводственного эффекта.



Рис. 6. Эффективность подавления осины в опыте 2.
Слева и справа – необработанные деревья

Fig. 6. Effectiveness of aspen suppression in experiment 2.
Untreated trees are on both sides

В опыте 3 через 35 дней после обработки арборицидное действие проявилось во всех вариантах. Наибольшая доля отмерших листьев ольхи (43,8 %) отмечена в варианте 1 (рис. 7). В вариантах с применением низкой дозы Арбонала и смеси Торнадо и Арбонала в небольших концентрациях отмечены самые малые на данном этапе показатели эффективности – 3 и 4,6 % соответственно.

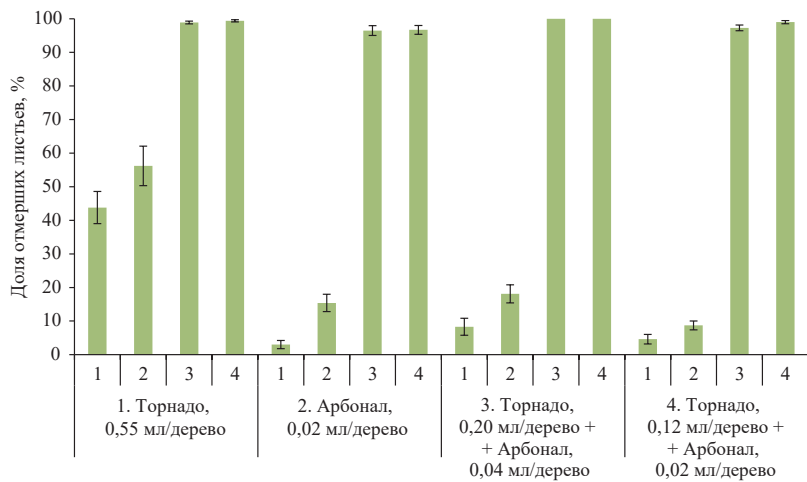


Рис. 7. Динамика отмирания листьев ольхи в опыте 3 с ошибкой

Fig. 7. Dynamics of alder leaves dieback in experiment 3 with an error

Через 2 месяца после обработки значительно большая эффективность относительно остальных вариантов также наблюдалась в варианте 1: отмерло 56,2 % листьев. В варианте 2 доля усохших листьев повысилась более чем в 5 раз по сравнению с показателем 1-го учета. Полностью погибших деревьев на данном этапе не зафиксировано ни в одном из вариантов.

На следующий год после обработки во всех вариантах опыта отмечено существенное усиление эффективности влияния гербицидов. Наиболее действенной была смесь Торнадо в концентрации 0,20 мл/дерево с Арбоналом 0,04 мл/дерево – степень отмирания листьев и деревьев составила 100 % (рис. 8).

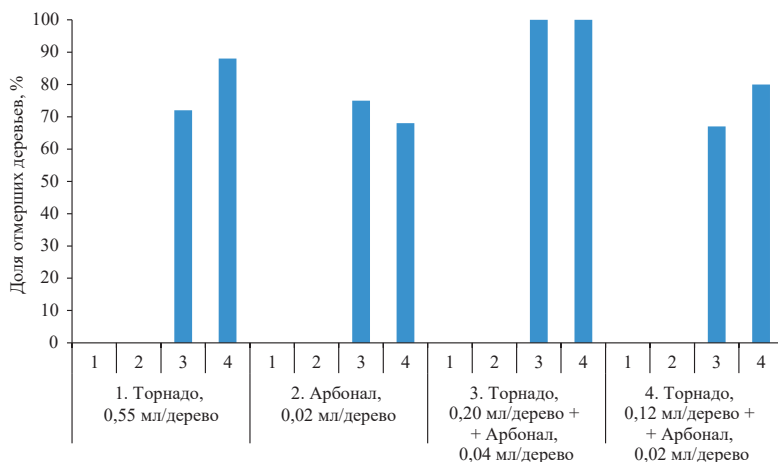


Рис. 8. Динамика отмирания ольхи в опыте 3

Fig. 8. Dynamics of alder trees dieback in experiment 3

Первый учет в опыте 4 выявил активное подавление осины во всех вариантах (рис. 9). Через месяц в варианте 1 почти все деревья погибли. Наименьшая эффективность (менее 30 % отмерших листьев) отмечена в варианте 3.

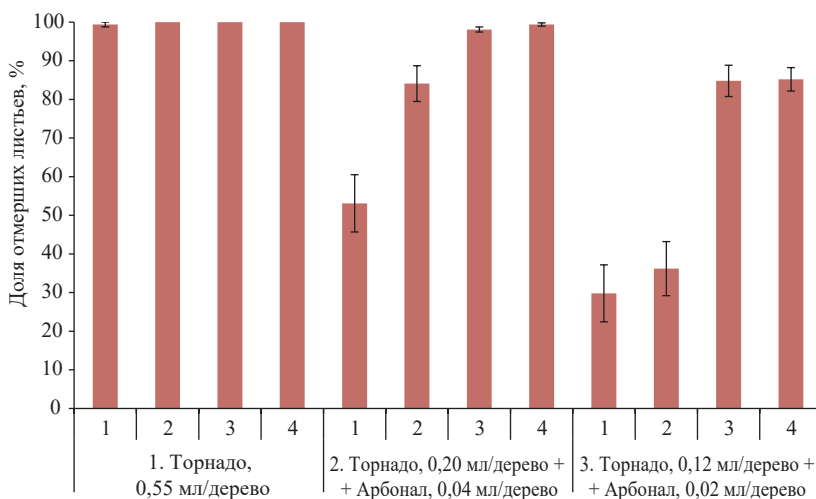


Рис. 9. Динамика отмирания листьев осины в опыте 4 с ошибкой (кроме вариантов, где погибло 100 % листьев)

Fig. 9. Dynamics of aspen leaves dieback in experiment 4 with an error (except the variants where 100 % of leaves died)

Через 2 месяца в варианте 1 зафиксирована 100%-ная гибель деревьев, в варианте 2 – 60 %, а в варианте 3 – лишь 12 %. При этом смесь Торнадо 0,12 мл + Арбонал 0,02 мл показала низкую эффективность: 36,2 % отмерших листьев и 12 % погибших деревьев.

В течение следующего вегетационного сезона эффективность действия гербицидов в вариантах 2 и 3 увеличилась. В варианте 2 степень отмирания листьев составила 98,1–99,4 %, а гибель деревьев достигла 74,1–93,0 %.

В варианте 3, несмотря на рост доли отмерших листьев до 85,2 %, количество погибших деревьев осталась низким – менее 30 % (рис. 10). Наиболее перспективными для подавления осины оказались Торнадо в дозе 0,55 мл/дерево, Арбонал 0,08 мл/дерево и их смесь Торнадо 0,12 мл + Арбонал 0,08 мл/дерево. Менее эффективны Торнадо 0,20 мл/дерево, а также смеси Торнадо 0,20 мл/дерево + Арбонал 0,04 мл/дерево и Торнадо 0,12 мл/дерево + Арбонал 0,04 мл/дерево. Применение низких доз Торнадо (0,12 мл/дерево), Арбонала (0,04 мл/дерево) и их смеси (Торнадо 0,12 мл/дерево + Арбонал 0,02 мл/дерево) признано малоперспективным из-за низкой доли отмерших деревьев.

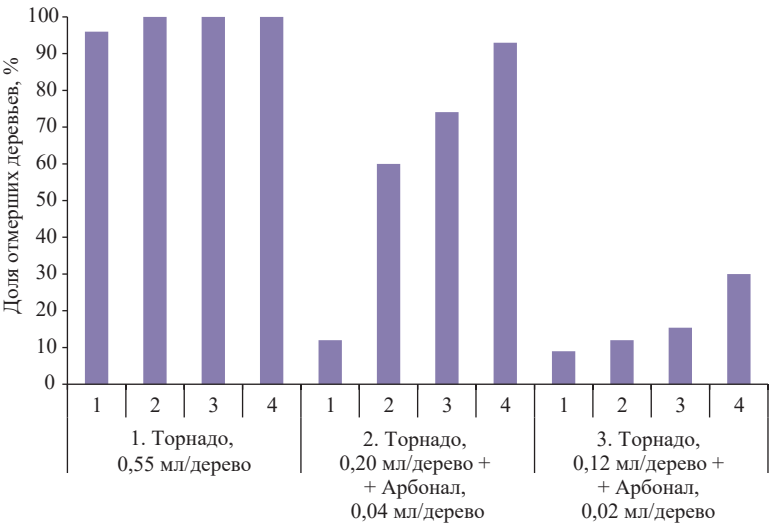


Рис. 10. Динамика отмирания деревьев осины в опыте 4
Fig. 10. Dynamics of aspen trees dieback in experiment 4

При расчетах экономической эффективности были использованы фактические трудозатраты на проведение инъекции гербицидов в 2 полевых производственных опытах 2024 г. Проверены варианты применения гербицидов, признанные наиболее перспективными по результатам многочисленных мелкоделяночных опытов подавления основных лиственных древесных пород: Торнадо 0,20 мл/дерево, Арбонал 0,08 мл/дерево и смесь Торнадо 0,25 мл/дерево + Арбонал 0,06 мл/дерево.

Средняя стоимость гербицидов в 2024 г. составляла: Торнадо – 1100 р за 1 л; Арбонал – 3100 р за 1 л. Таким образом, стоимость гербицидов в варианте с Торнадо составила 242 р., в варианте с Арбоналом – 298 р., в варианте со смесью Торнадо и Арбонала – 460 р. Трудозатраты на проведение инъекций для устранения 100 скл. м³ нежелательных лиственных пород с 1 га насаждения составляют 0,33 человека/день (см. таблицу).

**Экономическая эффективность технологии инъекции гербицидов
по сравнению с базовой технологией для 100 скл. м³ деревьев
Cost effectiveness of herbicide injection technology compared
to the basic technology for 100 stacked m³ of trees**

Вид работ	Оборудование	Норма выработки, скл. м ³	Требуемое количе- ство в смену		Затраты, р.
			человек	машин	
Спиливание деревьев	Кусторез, бензопила Stihl	38,7	2,58	2,58	21 400
Инъекция гербицидов	Дрель, иньектор	300,0	0,33	—	1000–1300

Оценка экономической эффективности технологии проводилась из расчета частичного устранения лиственных пород по аналогии с базовой технологией. Базовая технология предусматривала 1 механический уход с применением кустореза Stihl с изъятием 100 скл. м³ деревьев нежелательных лиственных пород с 1 га насаждения.

Установлено, что применение инъекции гербицидов в стволы деревьев лиственных пород обеспечивает снижение трудозатрат в 7,8 раза по сравнению с традиционными (базовыми) технологиями уходов. Общие затраты на устранение 100 скл. м³ деревьев нежелательных лиственных пород с 1 га насаждения с применением технологии инъекции гербицидов в зависимости от варианта в 16–21 раз ниже по сравнению с базовой технологией.

Выводы

1. Показана высокая биологическая и экономическая эффективность применения гербицидов Торнадо и Арбонала (а также их смесей) способом инъекции в стволы ольхи серой и осины при регулировании состава и густоты смешанных молодняков.

2. Торнадо в дозах 0,20–0,55 мл/дерево и смесь Торнадо и Арбонала (0,12–0,20 + 0,04–0,08 мл/дерево) значительно быстрее Арбонала в отдельности подавляют ольху и осину. Арбонал эффективно устраняет лиственные породы через 1 год после обработки.

3. Ольху наиболее эффективно подавляют Арбонал в дозах 0,04–0,08 мл/дерево и смесь Торнадо 0,12 мл/дерево + Арбонал 0,04–0,08 мл/дерево. В этих вариантах полностью отмерли все обработанные деревья. Несколько более низкая результативность зафиксирована в вариантах с применением Торнадо в дозах 0,20–0,55 мл/дерево.

4. Осина оказалась наиболее чувствительной к Торнадо в дозе 0,55 мл/дерево, Арбоналу 0,08 мл/дерево и смесям Торнадо 0,12–0,20 мл/дерево + Арбонал 0,04–0,08 мл/дерево. Также хорошая эффективность отмечена для варианта Торнадо 0,2 мл/дерево.

5. Подтверждена возможность снижения доз гербицидов без ущерба для эффективности подавления лиственных древесных пород. Оптимизация количества препарата позволяет сократить токсическое воздействие на экосистемы и повысить экономическую привлекательность метода внутривитовых инъекций в фазе жердняка. Если диаметр дерева не более 12 см, для его успешного подавления достаточно 1 насечки, при диаметре 12–15 см необходимо сделать 2 насечки. Единичные деревья большего диаметра целесообразно устранить путем добавления еще 1–2 дополнительных насечек.

6. Применение инъекции гербицидов на стадии жердняка дает возможностькратно сократить по сравнению с традиционными технологиями уходо-расход как трудовых, так и финансовых ресурсов с одновременным повышени-ем лесоводственной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бубнов А.А., Егоров А.Б., Павлюченкова Л.Н., Постников А.М. Экологическая оценка гербицидов, используемых при лесовыращивании // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 4. С. 58–75.

Bubnov A.A., Egorov A.B., Pavluchenkova L.N., Postnikov A.M. Ecological Evaluation of Herbicide Application in Forest Cultivation. *Proceedings of the Saint Petersburg Research Institute of Forestry*, 2022, no. 4, pp. 58–75. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.4.58>

2. Бубнов А.А., Постников А.М., Егоров А.Б., Павлюченкова Л.Н., Партолина А.Н. Регулирование состава насаждений способом инъекции гербицидов в стволы деревьев нежелательных древесных пород: история и перспективы // Тр. СПбНИИЛХ. 2023. № 2. С. 4–17.

Bubnov A.A., Postnikov A.M., Egorov A.B., Pavluchenkova L.N., Partolina A.N. Regulation of the Composition of Plantations by the Method of Injection of Herbicides into Unwanted Tree Species: History and Perspectives. *Proceedings of the Saint Petersburg Research Institute of Forestry*, 2023, no. 2, pp. 4–17. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.2.4>

3. Долженко В.И., Петунова А.А., Маханькова Т.А. Биолого-токсикологические требования к совершенствованию ассортимента гербицидов на рубеже XXI века // Состояние и развитие гербологии на пороге XXI столетия: материалы второго Всерос. науч.-производств. совещ. Голицыно, 2000. С. 122–126.

Dolzhenko V.I., Petunova A.A., Makhan'kova T.A. Biological and Toxicological Requirements for Improving the Range of Herbicides at the Turn of the 21st Century. *The State and Development of Herbology on the Threshold of the 21st Century: Materials of the 2nd All-Russian Scientific and Production Meeting*. Golitsino, 2000, pp. 122–126. (In Russ.).

4. Егоров А.Б. Восстановление хвойных лесов регулированием состава и строения фитоценозов химическим способом: современное состояние и перспективы развития // Современные проблемы и эффективность регулирования фитоценозов в лесном хозяйстве. Тр. СПбНИИЛХ, 1999. С. 9–23.

Egorov A.B. Restoration of Coniferous Forests by Chemical Regulation of the Composition and Structure of Phytocenoses: Current Status and Development Prospects. Current Issues and Effectiveness of Phytocenoses Regulation in Forestry. *Proceedings of the Saint Petersburg Research Institute of Forestry*, 1999, pp. 9–23. (In Russ.).

5. Ильин В.П., Подшиваев Е.Е. Реконструкция двухъярусного осиново-елового древостоя посредством химической подсушки осины // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2014. № 38. С. 82–85.

Ilyin V.P., Podshivaev E.E. Reconstruction of a Two-Tiered Aspen-Spruce Stand Using Chemical Drying of Aspen. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2014, no. 38, pp. 82–85. (In Russ.).

6. Калинин Н.П., Писаренко А.И., Смирнов Н.А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Экология, 1991. 384 с.

Kalinichenko N.P., Pisarenko A.I., Smirnov N.A. *Reforestation in Clearings*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 384 p. (In Russ.).

7. Постников А.М., Егоров А.Б., Бубнов А.А., Павлюченкова Л.Н. Биологическая эффективность способа инъекции гербицидов и их смесей в стволы деревьев нежелательных пород // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2024. № 248. С. 57–74.

Postnikov A.M., Egorov A.B., Bubnov A.A., Pavlyuchenkova L.N. Biological Efficiency of the Method of Injecting Herbicides and Their Mixtures into Tree Trunks of Unwanted Species. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 57–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.57-74>

8. Постников А.М., Егоров А.Б., Бубнов А.А., Павлюченкова Л.Н., Партолина А.Н. Ассортимент гербицидов для применения в лесном хозяйстве способом инъекции в стволы деревьев // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 335–337.

Postnikov A.M., Egorov A.B., Bubnov A.A., Pavlyuchenkova L.N., Partolina A.N. Range of Herbicides for Application in Forestry by Injection into Tree Trunks. Forests of Russia: Policy, Industry, Science, and Education. *Proceedings of the 8th All-Russian Scientific and Technical Conference, May 24–26, 2023*. Saint Petersburg, SPSFTU Publ., 2023, pp. 335–337. (In Russ.).

9. Редько Г.И., Бабич Н.А. Лесовосстановление на европейском севере России. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1994. 188 с.

Redko G.I., Babich N.A. *Reforestation in the European North of Russia*. Arkhangelsk, North-West Book Publishing House, 1994. 188 p. (In Russ.).

10. Соколов А.И. Лесовосстановление на вырубках северо-запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 215 с.

Sokolov A.I. *Reforestation in Forest Cuttings of the North-West of Russia*. Petrozavodsk, KSC RAS Publ., 2006. 215 p. (In Russ.).

11. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. 2021 г.: приложение к журналу «Защита и карантин растений». № 4. М.: Колос, 2021. 815 с.

List of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use in the Russian Federation. 2021: Supplement to the Journal “Plant Protection and Quarantine”. No. 4. Moscow, Kolos Publ., 2021. 815 p. (In Russ.).

12. Трофимов Л.Н. Экономическая оценка химического ухода за молодняками в производственных условиях (на примере Ленинградской области) // Тр. СПбНИИЛХ. 2004. Вып. 1(11). С. 114–118.

Trofimov L.N. Economic Assessment of Young Growth Chemical Tending in Production Environment (Case Study of the Leningrad Region). *Proceedings of the Saint Petersburg Research Institute of Forestry*, 2004, no. 1(11), pp. 114–118. (In Russ.).

13. Федорчук В.Н., Нешатаев В.Ю., Кузнецова М.Л. Лесные экосистемы северо-западных районов России: типология, динамика, хозяйственные особенности. СПб.: СПбНИИЛХ, 2005. 382 с.

Fedorchuk V.N., Neshataev V.Yu., Kuznetsova M.L. *Forest Ecosystems of the Northwestern Regions of Russia: Typology, Dynamics, Economic Characteristics*. Saint Petersburg, SPbNILH Publ., 2005. 382 p. (In Russ.).

14. Чижов Б.Е., Штоль В.А., Герасимова М.В., Глухарева М.В. Совершенствование химического метода подсушки нежелательных деревьев при уходе за лесом // Лесохоз. информ. 2015. № 1. С. 42–49.

Chizhov B.E., Shtol V.A., Gerasimova M.V., Glukhareva M.V. Improvement of Undesirable Tree Pre-Drying Chemical Procedure in Thinnings. *Forestry information*, 2015, no. 1, pp. 42–49. (In Russ.).

15. Archer L., Crane G.H., Albrecht U. Trunk Injection as a Tool to Deliver Plant Protection Materials – An Overview of Basic Principles and Practical Considerations. *Horticulturae*, 2022, vol. 8, iss. 6, art. 552. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060552>

16. Badalamenti E., La Mantia T. Stem-Injection of Herbicide for Control of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle: A Practical Source of Power for Drilling Holes in Stems. *iForest*, 2013, vol. 6, pp. 123–126. <https://doi.org/10.3832/ifor0693-006>

17. DiTomaso J.M., Kyser G.B. Control of *Ailanthus altissima* Using Stem Herbicide Application Techniques. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2007, vol. 33, no. 1, pp. 55–63. <https://doi.org/10.48044/jauf.2007.007>

18. Ford S. Cut and Inject Herbicide Control of Japanese Knotweed *Fallopia japonica* at Rocky Valley, Cornwall, England. *Conservation Evidence*, 2004, no. 1, pp. 1–2.

19. Kochenderfer J.D., Miller G.W., Kochenderfer J.N. *A Comparison of Two Stem Injection Treatments Applied to American Beech in Central West Virginia*. Research Paper NRS-21. Newtown Square, PA, USDA, Northern Research Station. 2012. 10 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-RP-21>

20. Lewis K., McCarthy B. Nontarget Tree Mortality After Tree-of-Heaven (*Ailanthus altissima*) Injection with Imazapyr. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2008, vol. 25, iss. 2, pp. 66–72. <https://doi.org/10.1093/njaf/25.2.66>

21. McKenzie J., Brazier D., Owen A., Vitelli J., Mayer B. Stem Injection: A Control Technique Often Overlooked for Exotic Woody Weeds. *Proceedings of 17th Australasian Weeds Conference “New Frontiers in New Zealand: Together We Can Beat the Weeds”*, September 26-30, 2010. Christchurch, New Zealand, Christchurch Convention Centre, 2010, pp. 459–461.

22. O’Brien C.J., Mellor V., Galea V.J. Controlling Woody Weed Chinese Elm (*Celtis sinensis* Pers.) with Stem-Implanted Herbicide Capsules. *Plants*, 2022, vol. 11, iss. 3, art. 444. <https://doi.org/10.3390/plants11030444>

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

Научная статья

УДК 581.55*574.472

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-68-81

Структура растительности благоустроенной части экопарка Гремячая Грива (г. Красноярск)

А.Д. Маркова[✉], начальник отдела; ResearcherID: [POS-7119-2026](#),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9055-6741>

О.М. Шабалина, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [ABG-9442-2020](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0777-946X>

И.Н. Безкоровайная, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [P-9431-2016](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6307-2381>

Институт экологии и географии Сибирского федерального университета, просп. Свободный, д. 79, стр. 4, г. Красноярск, Россия, 660041; id187850377@mail.ru[✉], shabalina11@bk.ru, birinik-2011@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.04.25 / Одобрена после рецензирования 09.07.25 / Принята к печати 10.07.25

Аннотация. Красноярск – 2-й по численности населения город-миллионник в Сибири – со всех сторон окружен лесами, однако жители большинства районов города испытывают дефицит зеленой инфраструктуры ближнего доступа. Тем ценнее для населения пригородные леса, частью которых является экопарк Гремячая Грива, созданный в 2018 г. Проведенные масштабные работы по благоустройству территории и резко возросший поток посетителей повлияли на состав и структуру лесных сообществ, однако современной информации о состоянии растительности благоустроенной части экопарка нет. Леса экопарка подтаежного типа представлены преимущественно смешанными сосняками и березняками разнотравной и орляковой серий типов леса, находящихся на 1–3-й стадиях рекреационной дигрессии. По результатам кластерного анализа в составе сосновой и березовой формаций экопарка были выделены группы сообществ, различающиеся по происхождению, стадии рекреационной дигрессии, составу и степени развития нижних ярусов. Как правило, в кластер объединяются сообщества, находящиеся на одной или близких стадиях дигрессии и сходные по составу и структуре. Наименее нарушенными являются сосняки разнотравные, отличающиеся высокой видовой насыщенностью (до 45 видов на 100 м²) и отсутствием синантропных видов, преимущественно здесь обнаружены редкие декоративные виды, в т. ч. входящие в Красную Книгу РФ. С другой стороны, вблизи наиболее посещаемых мест (визит-центры № 1 и 2, детские площадки) доминируют березняки разнотравные 3-й стадии дигрессии с разреженным живым напочвенным покровом, высокой долей синантропных видов в составе, внедрением под полог видов-интродуцентов, наиболее опасным из которых является *Acer negundo*, включенный в Черную книгу флоры Средней России.

Ключевые слова: рекреационная нагрузка, растительные сообщества, сосняки, березняки, рекреационная дигрессия, инвазивные виды, биоразнообразие, экопарк, Гремячая Грива

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Красноярского краевого фонда науки № КФН-771, Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSRZ-2023-0007).



Для цитирования: Маркова А.Д., Шабалина О.М., Безкоровайная И.Н. Структура растительности благоустроенной части экопарка Гремячая Грива (г. Красноярск) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 68–81. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-68-81>

Original article

Vegetation Structure of the Landscaped Area of the Gremyachaya Griva Ecopark (Krasnoyarsk)

Anna D. Markova[✉], Head of Department; ResearcherID: [POS-7119-2026](https://orcid.org/0009-0002-9055-6741),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9055-6741>

Olga M. Shabalina, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABG-9442-2020](https://orcid.org/0000-0003-0777-946X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0777-946X>

Irina N. Bezkorovaynaya, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [P-9431-2016](https://orcid.org/0000-0002-6307-2381),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6307-2381>

School of Ecology and Geography of Siberian Federal University, prosp. Svobodnyy, 79, str. 4, Krasnoyarsk, Russia, 660041; id187850377@mail.ru[✉], shabalina11@bk.ru, birinik-2011@yandex.ru

Received on April 23, 2025 / Approved after reviewing on July 9, 2025 / Accepted on July 10, 2025

Abstract. Krasnoyarsk is the second most populous city in Siberia with over a million residents. It is surrounded by forests on all sides; however the citizens in the majority of the city's districts have limited access to green spaces. This makes the suburban forests even more valuable to the local population; among them is the Gremyachaya Griva Ecopark, established in 2018. The extensive landscaping works carried out and the sharp increase in the number of visitors have affected the composition and structure of forest communities. However, there is no current information on the vegetation status of the landscaped section of the eco-park. The sub-taiga forests of the ecopark are mainly represented by mixed pine and birch forests of the mixed-grass and bracken forest types, currently in stages 1–3 of recreational digression. According to the results of cluster analysis, groups of communities were identified in the pine and birch formations of the ecopark; the groups differ in origin, stage of recreational digression, composition, and development degree of the lower storey. As a rule, a cluster comprises communities that are at the same or similar stages of development and are similar in composition and structure. The least disturbed areas are the mixed-grass pine forests, which are rich in species diversity (up to 45 species per 100 m²) and lack synanthropic species; the flora here consists primarily of rare ornamental species, including those listed in the Red Data Book of the Russian Federation. Conversely, mixed-grass birch forests in the third stage of digression dominate near the most visited sites (Visitor Centers No. 1 and 2, playgrounds). The forests are characterized by broken forest live cover, a high proportion of synanthropic species in the composition, and the invasion of introduced species under the canopy. The most dangerous of which is *Acer negundo*, listed in the Black Book of the Flora of Central Russia.

Keywords: recreational load, plant communities, pine forests, birch forests, recreational digression, invasive species, biodiversity, ecopark, Gremyachaya Griva

Funding: The research was financially supported by the Krasnoyarsk Regional Fund of Science and Technology Support grant No. КФН-771 and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSRZ-2023-0007).

For citation: Markova A.D., Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N. Vegetation Structure of the Landscaped Area of the Gremyachaya Griva Ecopark (Krasnoyarsk). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 68–81. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-68-81>

Введение

Сохранение пригородных лесов – это ключевая задача для обеспечения устойчивого развития городов, поскольку зеленая инфраструктура выполняет целый спектр экосистемных услуг. Лес благоприятно влияет на микроклимат, снижает скорость ветра и обладает шумоизоляционными свойствами. Древесные насаждения, как огромный фильтр, очищают воздух от пыли и различных аэрозолей, перерабатывают углекислый газ, пополняют запасы кислорода, выделяют летучие вещества – фитонциды, подавляющие болезнетворные микробы [4, 13, 28].

Важнейшая из экосистемных услуг, оказываемая городской зеленой инфраструктурой, – предоставление горожанам условий для прогулочного отдыха и занятий спортом. Лесная рекреация в настоящее время приобрела наибольшую актуальность из-за комфортной доступности и дешевизны [7]. Однако под влиянием рекреационной нагрузки все компоненты лесных экосистем претерпевают изменения [13, 18, 21, 29, 33].

Красноярск характеризуется как благоприятный город с точки зрения «компактности», т. е. основной застройкой в пределах городского ядра и ограниченным разрастанием на прилегающие территории. Зеленая инфраструктура города имеет площадь 197,59 км² и составляет 52,3 % от площади города. Однако ее качество низкое. Согласно интегральной оценке эффективности и устойчивости зеленой инфраструктуры, Красноярск занимает предпоследнее место среди городов-миллионников России [13]. Неудовлетворительные оценки даются по целому ряду показателей – площади зеленых насаждений, доле особо охраняемых природных территорий, степени фрагментированности и др. Около 70 % зеленой площади города приходится на его западную окраину и о. Татышев, тогда как вытянутые вдоль реки жилые районы испытывают дефицит зеленой инфраструктуры ближнего доступа.

Основные лесные массивы сосредоточены на юго-востоке и юго-западе города [1]. Частью этих пригородных лесов является экопарк Гремячая Грива, созданный в 2018 г. и с 2022 г. являющийся претендентом на получение статуса особо охраняемой природной территории [17]. На землях первой очереди благоустройства экопарка представлено 2 визит-центра, 3 спортивные площадки, 11 детских площадок, экопавильон и др. Острый недостаток зеленой инфраструктуры ближнего доступа, особенно выраженный в Железнодорожном районе города, привел к тому, что рекреационная нагрузка на территорию экопарка возросла многократно. Наиболее посещаемой частью экопарка является площадь между визит-центрами № 1 и 2. Здесь сосредотачивается основная масса посетителей, а в выходные и праздничные дни проводятся соревнования, мастер-классы для семей, экскурсии и т. д.

Обширные работы по благоустройству территории экопарка, а также резко возросший поток посетителей не могли не повлиять на состав и структуру лесных сообществ. Однако информации о состоянии зеленой инфраструктуры

благоустроенной части территории экопарка нет. Целью работы стало исследование состава и структуры лесных растительных сообществ территории первой очереди благоустройства экопарка Гремячая Грива.

Объекты и методы исследования

Экопарк Гремячая Грива расположен на левом берегу р. Енисей и является частью зеленой зоны города. Ряд сопок, конечной из которых является Николаевская (или Большая), как бы вклиниваются в городскую черту. Экопарк ограничивается с востока и севера городской застройкой; с юго-востока и запада – крутыми склонами соответственно террасы р. Енисей и левого борта долины р. Собакиной. Общая площадь парка составляет почти 400 га, в т. ч. наиболее посещаемой территории (первой очереди благоустройства) – около 50 га.

Климат района резко континентальный с продолжительной малоснежной зимой, короткими теплым летом и сухой весной с поздними заморозками, непродолжительной осенью с ранними заморозками и частыми возвратами тепла. Устойчивые сильные морозы зимой обусловлены влиянием сибирского антициклона, однако в течение большей части года преобладает циклоническая форма циркуляции атмосферы. Средняя для территории температура января – $-15,6^{\circ}\text{C}$, июля – $19,1^{\circ}\text{C}$. Колебания абсолютных температур возможны в январе от 6 до -55°C , а в июле – от 3 до 40°C . В зимний период в городе ежегодно наблюдаются оттепели [8, 16].

Годовая сумма осадков составляет 477 мм, большая часть из них выпадает летом и имеет преимущественно ливневый характер. Недостаток влаги ощущается в основном в начале июня, который является самым пожароопасным периодом, поскольку нередки засухи [8, 16].

Леса экопарка относятся к подтаежному типу, представлены преимущественно сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) и березовыми (*Betula pendula* Roth, *B. pubescens* Ehrh.) формациями с примесью *Abies sibirica* Ledeb., *Populus tremula* L., *Larix sibirica* Ledeb. [3]. Все березняки имеют естественное происхождение, сосняки часто представлены культурами 40–50-летнего возраста. Эпизодически встречаются осинники.

Объектом исследования стала растительность рекреационной части экопарка (рис. 1). Большая часть пробных площадей (ПП) была заложена на территории первой очереди благоустройства. Отдельные описания выполнены для участков за ее пределами для возможности сравнения сообществ с разным уровнем рекреационной нагрузки.

В число изученных сообществ вошли наиболее распространенные на территории экопарка формации: березняки и сосняки. Наименование пробным площадям дано по следующему принципу: первая буква (заглавная) указывает на лесобразующую породу (Р – *Pinus*, В – *Betula*), строчные буквы обозначают тип леса (например, ср – *caricoso-pteridosum*), число вне скобок – порядковый номер ПП, число в скобках – стадия рекреационной дигрессии.

Геоботанические описания проводились на пробных площадях размером 10×10 м по традиционным методикам [2], одновременно оценивалась стадия рекреационной дигрессии по Н.С. Казанской и др. [12]. Общее количество описаний – 50. Для оценки обилия видов была использована комбинированная

шкала обилия-покрытия Ж. Брауна-Бланке. Названия видов приведены по данным «Флоры Сибири» [22] с корректировкой по открытому атласу-определителю «Плантаариум» [20].

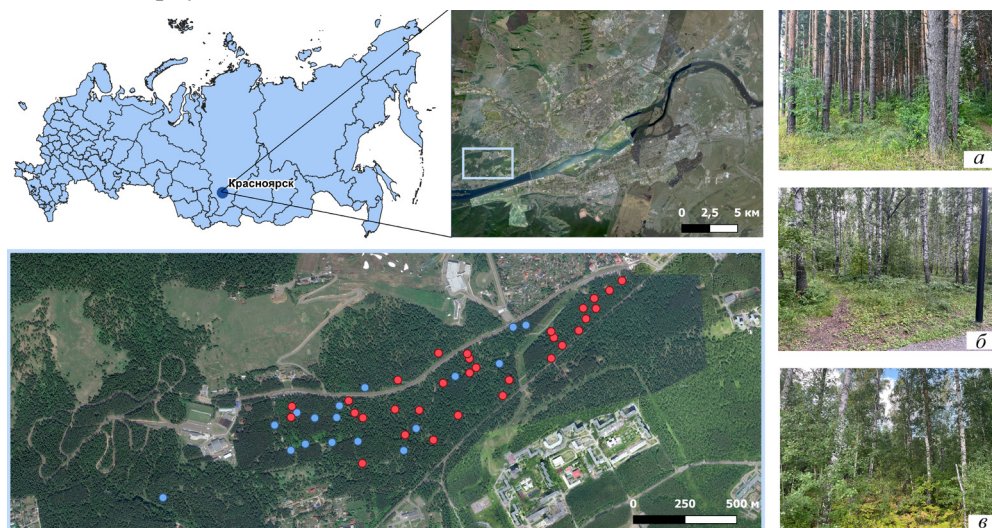


Рис. 1. Размещение пробных площадей (• – березняки, • – сосняки) на территории экопарка (карта построена с помощью геоинформационной системы QGIS 3.38 Grenoble, спутниковые данные – Landsat 3) и их внешний вид: а – сосняк разнотравный; б – березняк осочково-разнотравный; в – березняк орляково-осочковый

Fig. 1. Location of sample plots (• – birch forests, • – pine forests) within the ecopark (map created using the QGIS 3.38 Grenoble geographic information system; satellite data – Landsat 3) and their photos: а – mixed-grass pine forest; б – sedge-mixed-grass birch forest; в – bracken-sedge birch forest

Экологический анализ выполнен с помощью интегрированной ботанической информационной системы IBIS [10]. Использованы классификация эколого-ценотических групп А.Л. Эбеля [25] с уточнением по базе данных «Ценофонд лесов Европейской России» [23].

Для оценки фитоценотического разнообразия территории применен кластерный анализ при помощи программы PAST 4.12 [30] методом Paired group (UPGMA) на основе бинарной матрицы сходства, построенной в IBIS [10] по индексу Чекановского-Сьеренсена.

Результаты исследования и их обсуждение

В составе всех исследуемых растительных сообществ было встречено 120 видов высших растений, относящихся к 95 родам, 41 семейству. Более 97 % видов относятся к цветковым растениям, из них свыше 84 % – двудольные. Число видов в описаниях варьировало от 20 до 45.

Для территории экопарка характерны 2 основные формации растительности: березовая (*Betula pendula*) и сосновая (*Pinus sylvestris*). Они представлены ассоциациями разнотравной (сосняк разнотравный, березняк осочково-разнотравный и др.) и орляковой серий типов леса (сосняк осочково-орляковый, березняк орляково-осочковый и др.). Сообщества разнотравной серии типов леса входят в число наиболее ценных в рекреационном отношении, поскольку в них создается оптимальный режим освещения, а хорошо развитый тра-

вяной покров отличается декоративностью. Виды, привлекающие посетителей, – красоднев желтый (*Heimerocallis lilio-asphodelus* L.), купена душистая (*Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce), лилия саранка (*Lilium pilosiusculum* (Freyn) Misch.), борец бородатый (*Aconitum barbatum* Pers.) и др. Однако наряду с декоративными видами здесь произрастает большое количество сорных растений – *Cirsium setosum* (Willd.) Besser, *Arctium tomentosum* Mill., *Artemisia vulgaris* L. и др., – в ряде случаев создающих сплошной покров на механически нарушенных участках. Доля синантропных видов в эколого-ценотической структуре сосняков достигает 3–5 %, березняков – 4 %, что указывает на повсеместное распространение процессов рекреационной дигрессии.

Расчет интегрального индекса нарушенности по шкале гемероботолерантности А.А. Зверева [11] подтверждает этот вывод. Шкала является амплитудно-оптимумной и имеет 9 градаций. Чем выше получаемое значение по шкале, тем больше трансформация растительных сообществ в результате комплексного антропогенного воздействия. Средняя представленность таксонов-индикаторов, определенных в шкале, составила 93,18 % от общего числа таксонов, зарегистрированных в геоботанических описаниях. Для сосняков индекс составил 3,9, для березняков – 3,8. Средний статус некоторых описаний по шкале гемероботолерантности достигает 4,5–4,6. Индекс 4 характерен для видов, которые могут произрастать при слабом антропогенном воздействии, их встречаемость падает с увеличением нарушенности территории, таким образом, это группа наиболее уязвима. На смену этим видам приходят высокотолерантные *Cirsium setosum*, *Taraxacum officinale* F.H. Wigg., *Trifolium repens* L. и др. – с большим индексом.

Большая часть сосняков сосредоточена в юго-западной части эконопарка Гремячая Грива (см. рис. 1). В древостое доминирует сосна высотой до 25–30 м, диаметром 30–35 см. Основу подроста составляет сосна обыкновенная до 8 м высотой и небольшого диаметра, в единичных сообществах в подросте встречаются береза повислая и осина обыкновенная. Сосновый подрост, как правило, угнетен (пожелтевшая хвоя, однобокость), что объясняется, прежде всего, недостатком света под пологом взрослых деревьев. Обилие всходов сосны приурочено к освещенным участкам со слабо развитым напочвенным покровом. Единично в составе подроста встречаются темнохвойные породы – ель и пихта, семена которых, по-видимому, попадают с прилегающих территорий.

Подлесок разнообразен и часто имеет значительное проективное покрытие. Декоративные виды, наиболее часто отмечаемые в подлеске, – кизильник (*Cotoneaster melanocarpus* Fisch. ex Blytt), черемуха (*Padus avium* Mill.), шиповник (*Rosa acicularis* Lindl.), рябина (*Sorbus sibirica* Hedl.) и др. Все виды аборигенных подлесочных пород декоративны – черемуха привлекает посетителей пышным цветением с мая по июнь, а шиповник – с июня по июль. В конце лета–начале осени ключевую роль в формировании внешнего вида парка играют плодоносящие растения рябины, шиповника и кизильника.

Сообщества с преобладанием березы повислой в древесном ярусе эконопарка представлены более широко, однако распределены по территории неравномерно, их преобладающая часть сосредоточена на северо-востоке (см. рис. 1). Примечательно, что значительное количество берез являются перестойными, что обуславливает риск их падения во время сильного ветра и представляет опасность для отдыхающих. На пробных площадях часто встречаются повален-

ные деревья. В древостое доминирует *Betula pendula* высотой до 25 м, диаметра 35–40 см.

Подрост в березняках, как и в сосновых сообществах, в основном представлен сосной. Значительную долю занимает береза вегетативного происхождения. На отдельных участках в березняках заложены лесные культуры из ели сибирской и сосны сибирской. Их высота достигает 4–6 м, жизненное состояние хорошее. Часто в подросте перестойных березняков встречается осина обыкновенная, способная сформировать вторичные временные насаждения на нарушенных местах.

В подлеске доминируют те же виды, что и в сосняках, встречается *Viburnum opulus* L. Березняки орляковые в целом сходны по своим характеристикам с березняками разнотравными, но менее декоративны, поскольку густой покров орляка создает монотонность, а также сильно затеняет поверхность почвы и препятствует развитию красочных видов лесного разнотравья.

Таким образом, сравнивая состав и структуру растительности сосновых и березовых сообществ, можно сделать вывод об их значительном сходстве в пределах экопарка, что естественно, учитывая их близость в сукцессионном ряду [9, 31].

Оценка фитоценотического разнообразия рекреационной части экопарка Гремячая Грива проводилась отдельно для сосняков и березняков. В результате кластерного анализа на основе бинарной матрицы сходства была получена дендрограмма (рис. 2), разделяющая сосняки на 2 кластера.

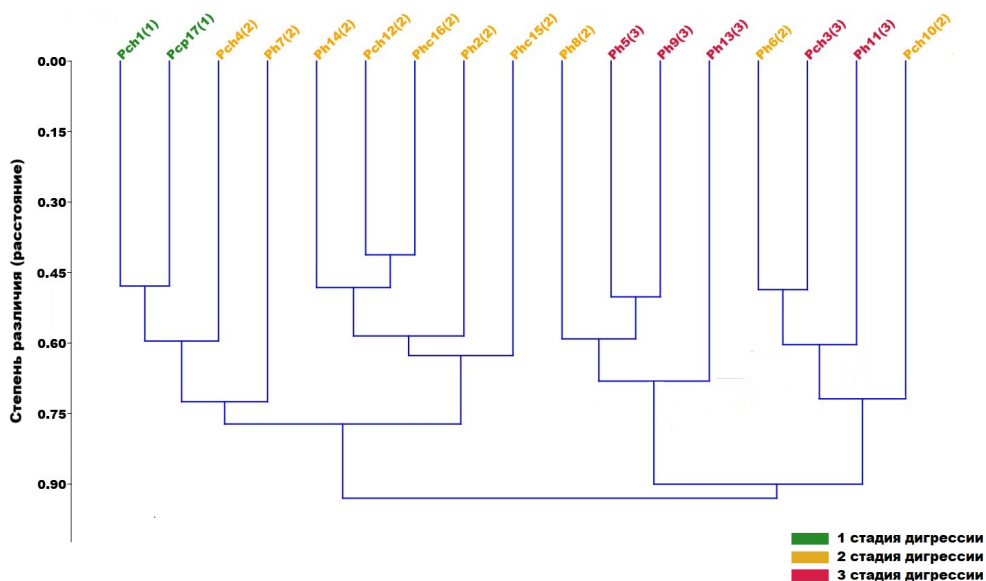


Рис. 2. Дендрограмма сходства и различия сосняков на территории экопарка

Fig. 2. Dendrogram showing the similarities and differences among pine forests within the ecopark

Первый кластер представлен 9 описаниями сообществ 2-й и 1-й стадий дигрессии. Число видов для этих описаний варьирует от 27 до 45. Всего зарегистрировано 88 видов. В эколого-ценотической структуре 73 % видов принадлежат к лесной группе, 17 % – к луговой, 3 % – к синантропной, 3 % – к лугово-степной.

Pch1(1), Pcp17(1), Pch4(2), Ph7(2) – группа описаний, сделанных в наименее нарушенных сообществах. Все они находятся в некотором отдалении от пешеходных дорожек. Основная доля растений – типично лесные виды: *Polygonatum odoratum*, *Pulmonaria mollis* Wulfen ex Hornem., *Pyrola minor* L., *Lathyrus humilis* (Ser.) Spreng. и др. Проективное покрытие живого напочвенного покрова варьирует от 80 до 100 %. Данные для сосняка осочково-разнотравного (Pch1(1)) и сосняка осочково-орлякового (Pcp17(1)) получены вне первой очереди экопарка, на территориях, где уровень рекреационной нагрузки ниже. Для них характерен большой набор видов (45 и 40 соответственно), а в эколого-ценотической структуре доля синантропных видов в первом случае не превышает 2 %, а во втором – такие виды отсутствуют. На этих пробных площадях обнаружен венерин башмачок крупноцветковый (*Cypripedium macranthos* Sw.), который входит в Красную книгу Красноярского края [14] и Красную книгу РФ [15].

Ph14(2), Pch12(2), Phc16(2), Ph2(2) и Phc15(2) – пробные площади в сосновых сообществах 2-й стадии дигрессии с разнообразным подлеском. Ph14(2), Pch12(2), Phc16(2) отличаются густым подлеском из *Padus avium*, *Rosa acicularis*, *Cotoneaster melanocarpus*, *Viburnum opulus*, *Swida alba* и др. Подлесок не мешает развиваться и живому напочвенному покрову: его проективное покрытие от 90 до 100 %. Преобладающую часть составляют лесные виды (от 77 до 94 % в эколого-ценотической структуре), доля синантропных растений не превышает 0,9 %.

Второй кластер, по-видимому, объединил более трансформированные рекреацией участки. В него вошли 8 описаний сообществ 2-й и 3-й стадий дигрессии. Число видов на описание варьирует от 22 до 37. Всего зарегистрирован 71 вид, что значительно меньше, чем в сообществах первого кластера. Важно, что в эколого-ценотической структуре по сравнению с первым кластером доля растений лесной группы понижается до 65 %, а синантропных видов – увеличивается в 2 раза.

Внутри второго кластера обособлено 2 группы. Первая группа объединила описания Ph8(2), Ph5(3), Ph9(3), Ph13(3), они сделаны в искусственных сосновых насаждениях, которые имеют хорошие жизненные показатели, однако эти сообщества отличаются слабо развитым живым напочвенным покровом из-за высокой густоты древостоя (сомкнутость крон – 0,8), что создает малую освещенность под пологом деревьев и высокую корневую конкуренцию. В этих сообществах желателен рубок ухода с целью разреживания древостоя и создания более благоприятных условий для развития травяного яруса. Флористическое богатство варьирует от 29 до 37 видов.

Вторая группа – Ph6(2), Pch3(3), Ph11(3), Pch10(2) – объединяет описания с доминированием в подлеске интродуцента клена американского (*Acer negundo* L.), внесенного в Черную книгу флоры Средней России [6]. При этом максимальное сходство между собой имеют описания Ph6(2) и Pch3(3), для которых проективное покрытие клена составляет 70–80 %, в других описаниях *A. negundo* представлен в меньшей степени. Влияние клена американского на аборигенную растительность изучено не до конца. Есть свидетельства, что при его внедрении в сообщества разнообразие коренных видов растений снижается [27]. Также некоторыми авторами было отмечено, что в сообществах с доминированием *A. negundo* высока доля рудеральных и чужеродных видов [5].

Заросли клена американского визуально непривлекательны, можно говорить о том, что распространение клена американского снижает качество экосистемных услуг. В отдельных исследованиях показано, что леса с *A. negundo* в подлеске менее посещаемы людьми [32]. На пробной площади Рсh3(3) был встречен экземпляр венериного башмачка настоящего (*Cypripedium calceolus* L., Красная книга Красноярского края, Красная книга РФ) низкой жизненности, скорее всего, это растение оставшееся от произрастающей на этом месте до благоустройства парка популяции, когда уровень рекреационной нагрузки был существенно ниже.

В результате обработки геоботанических описаний березняков не удалось однозначно выделить 2 кластера, однако можно провести условную линию между описаниями более и менее нарушенных сообществ (рис. 3). Так, в первый кластер вошли 16 описаний 2-й и 3-й стадий дигрессии, а во второй – 15 описаний 1-й и 2-й стадий. В эколого-ценотической структуре доля лесных видов для первого кластера варьирует от 55 до 74 % (среднее – 64 %), а для второго кластера – от 63 до 81 % (среднее – 71 %). Такое распределение подтверждает, что при увеличении стадии дигрессии сообщества происходит замена типично лесных видов луговыми и даже сорными растениями.

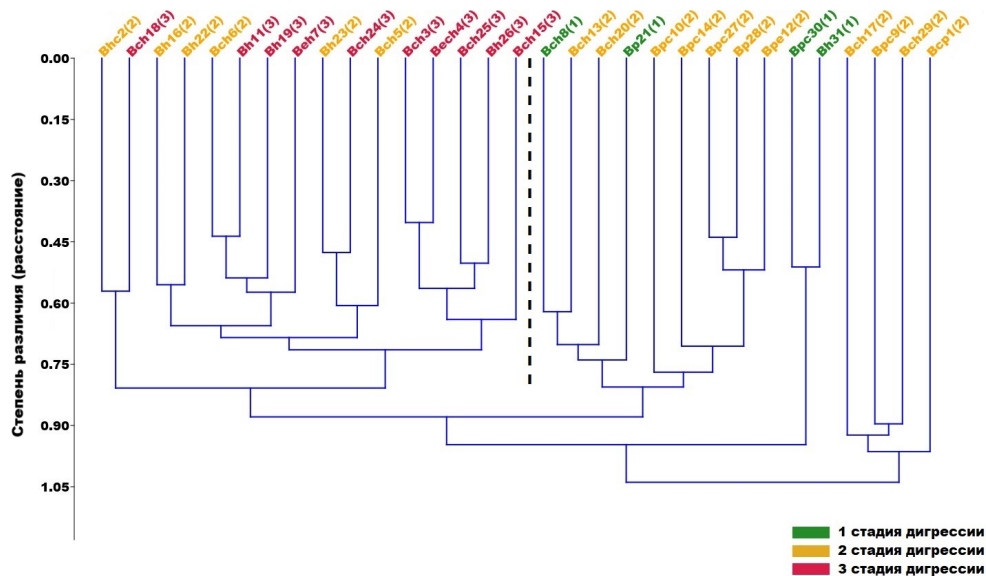


Рис. 3. Дендрограмма сходства и различия березняков на территории экопарка

Fig. 3. Dendrogram showing the similarities and differences among birch forests within the ecopark

Первый большой кластер представлен описаниями сообществ, характеризующихся существенной антропогенной трансформированностью. Сообщества этого кластера расположены в непосредственной близости от визит-центра № 1. Здесь встречены сообщества, находящиеся преимущественно на 3-й стадии дигрессии. Для них характерно преобладание березы субсенильного и сенильного онтогенетического состояния, практически полное отсутствие подроста, разреженность живого напочвенного покрова вследствие вытаптывания. Видовая насыщенность варьирует от 20 до 40 видов. В травяном ярусе

отсутствуют декоративные лесные виды, однако значительна доля высокотоле-
рантных синантропных видов: *Plantago major* L., *Taraxacum officinale*, *Trifolium*
repens, *Artemisia annua* L., *Vicia sepium* (L.) Moench и др. В.П. Чинова [24] отме-
чает, что подорожник и одуванчик занимают самые высокие позиции в рейтин-
ге устойчивости по стадиям дигрессии, поскольку для них характерны большая
прочность тканей, быстрая регенерация после повреждений, способность расти
на уплотненных почвах с минимальной аэрацией. Кроме того, в составе сооб-
ществ данного кластера повышена доля видов-интродуцентов из числа деревь-
ев и кустарников. Так, в подлеске Bch6(2), Bh11(3), Bh19(3), Bch7(3) доминан-
том является клен американский.

Видовое флористическое богатство сообществ второго кластера варьи-
рует от 29 до 42 видов. Всего в описаниях зарегистрировано 86 видов. Внутри
второго кластера обособляются 4 группы. Первая представлена березняками
осочково-разнотравными Bch8(1), Bch13(2), Bch20(2), Bp21(1). В подросте
на этих пробных площадях в разном количестве встречаются высаженные
и естественно произрастающие *Picea obovata* Ledeb. и *Pinus sibirica* Du Tour.
Их высота составляет 4–6 м, жизненное состояние хорошее. Проективное
покрытие живого напочвенного покрова варьирует от 95 до 100 %. Подле-
сок развит в разной степени в зависимости от количества и высоты культур
ели и кедра.

Во вторую группу входят березняки с преобладанием *Pteridium pinetorum*
Gureeva et C.N. Page в живом напочвенном покрове Bpc10(2), Bpc14(2), Bpc27(2),
Bp28(2), Bpe12(2). Проективное покрытие живого напочвенного покрова ва-
рьирует от 95 до 100 %. С орляком содоминируют *Carex macroura* Meinsh.,
Cimicifuga foetida L., *Equisetum pratense* Ehrh. Степень развития подлеска раз-
лична: на пробных площадях Bpc27(2) и Bp28(2) она слабая, а на Bpe12(2),
Bpc10(2) и Bpc14(2) проективное покрытие подлеска варьирует от 40 до 60 %.
Возможно, по этому признаку пробные площади и объединяются внутри груп-
пы. Доминантом в подлеске является *Padus avium*.

Орляк менее декоративен, чем разнотравье, создает труднопроходимые
заросли, не посещаемые отдыхающими, поэтому эти фитоценозы в меньшей
степени подвергаются рекреационной нагрузке. К тому же *Pteridium pinetorum*
сильно затеняет поверхность почвы и тем самым препятствует проникновению
сорных и других видов растений под полог леса [19, 26].

Bpc30(1), Bh31(1) – описания, сделанные за пределами первой очереди
экопарка. Для них характерно отсутствие видов синантропной эколого-цено-
тической группы и высокая доля видов лесной группы (74 и 76 % соответ-
ственно).

Четвертая группа объединила пробные площади Bch17(2), Bpc9(2),
Bch29(2), Bcp1(2). Данные описания достаточно разнообразны, однако в них
можно выделить сходство – развитые красочный подлесок и живой напочвен-
ный покров. Подлесок представлен мезофильными кустарниковыми поро-
дами: *Viburnum opulus*, *Crataegus sanguinea* Pall., *Rosa acicularis* и др. Проектив-
ное покрытие живого напочвенного покрова варьирует от 85 до 100 %. Уже
в мае–июне на этих пробных площадях можно наблюдать цветение *Pulmonaria*
mollis и *Trollius asiaticus* L. Единично отмечен входящий в Красную книгу
Красноярского края дремлик чемерицевидный (*Epipactis helleborine* (L.)
Crantz).

Заключение

Лесные сообщества наиболее посещаемой части экопарка Гремячая Грива относятся к типичным для подтайги разнотравной и орляковой сериям типов леса и обладают хорошим рекреационным потенциалом. Состав и структура растительности березовой и сосновой формаций достаточно схожи. Преобладают лесные и луговые виды, однако почти во всех сообществах под полог леса внедряются синантропные растения, что указывает на повсеместно протекающие процессы рекреационной дигрессии.

Уровень рекреационной нагрузки является ведущим экологическим фактором, обуславливающим различия состава и структуры лесных сообществ экопарка.

Регулярная оценка экологического состояния растительности экопарка поможет своевременно выявлять проблемы и принимать меры для их устранения до наступления необратимых последствий. В настоящий момент необходимо: а) сохранение биоразнообразия с поддержанием и восстановлением жизнеспособных популяций редких и декоративных видов; б) проведение рубок ухода в густых сосновых насаждениях с целью разреживания древостоя и создания более благоприятных условий для развития травяного яруса; в) контролирование распространения инвазивных видов; г) регулирование потока посетителей, оборудование информационных стендов; д) постепенное удаление перестойных берез, представляющих опасность для отдыхающих.

Развитие работы по присвоению территории парка статуса особо охраняемой природной территории поможет сохранить биологическое и ландшафтное разнообразие, защитить редкие и исчезающие виды растений и животных в непосредственной близости к городу. В таком случае экопарк и планируемый природный парк в целом будут долгое время сохранять экологическую и рекреационную значимость для населения г. Красноярск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александровская К.А., Авилова К.В., Илларионова О.А., Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Мерекалова К.А., Сулкарнаева Л.Д., Харитонов Т.И. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 3. Зеленая инфраструктура и экосистемные услуги крупнейших городов России / под ред. О.А. Климановой. М.: Центр охраны дикой природы, 2021. 112 с.

Aleksandriyskaya K.A., Avilova K.V., Illarionova O.A., Klimanova O.A., Kolbovskiy E.Yu., Merekalova K.A., et al. *Ecosystem Services in Russia: A Prototype National Report*. Vol. 3. Green Infrastructure and Ecosystem Services in Russia's Largest Cities. Ed. by O.A. Klimanova. Moscow, Biodiversity Conservation Center Publ., 2021. 112 p. (In Russ.).

2. Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Манзая Е.А., Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю., Таврова Н.И., Ярмишко В.Т., Ярмишко М.А. Методы изучения лесных сообществ / отв. ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузова. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.

Andreyeva E.N., Bakka I.Yu., Gorshkov V.V., Lyanguzova I.V., Manzaya E.A., Neshataev V.Yu., et al. *Methods for Studying Forest Communities*. Ed. by V.T. Yarmishko, I.V. Lyanguzova. Saint-Petersburg, NIИhimii SPbGU Publ., 2002. 240 p. (In Russ.).

3. Антипова Е.М., Рябовол С.В. Флора Красноярск. Красноярск: КГПУ им. В.П. Астафьева, 2009. 291 с.

Antipova E.M., Ryabovol S.V. *Flora of Krasnoyarsk*. Krasnoyarsk, KSPU named after V.P. Astafyev Publ., 2009. 291 p. (In Russ.).

4. Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Бولیшова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск: Удмуртск. ун-т, 2012. 206 с.

Bukharina I.L., Zhuravleva A.N., Bolyshova O.G. *Urban Plantings: An Ecological Aspect*. Izhevsk, Udmurt State University Publ., 2012. 206 p. (In Russ.).

5. Веселкин Д.В., Дубровин Д.И. Разнообразие травяного яруса урбанизированных сообществ с доминированием инвазивного *Acer negundo* // Экология. 2019. № 5. С. 323–331. <https://doi.org/10.1134/S0367059719050111>

Veselkin D.V., Dubrovin D.I. Diversity of the Grass Layer of Urbanized Communities Dominated by Invasive *Acer negundo*. *Ekologia* = Russian Journal of Ecology, 2019, vol. 50, pp. 413–421. <https://doi.org/10.1134/S1067413619050114>

6. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России (Чужеродные виды растений в экосистемах Средней России). М.: ГЕОС, 2009. 502 с.

Vinogradova Yu.K., Mayorov S.R., Khorun L.V. *The Black Book of the Flora of Central Russia (Alien Plant Species in the Ecosystems of Central Russia)*. Moscow, GEOS Publ., 2009. 502 p. (In Russ.).

7. Волков С.Н. Формы рекреации и их влияние на лесную растительность // Лесн. вестн. 2005. № 5. С. 153–157.

Volkow S.N. The Forms of Recreation and Their Influence on the Forest Vegetation. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2005, no. 5, pp. 153–157. (In Russ.).

8. Гидрометцентр России: офиц. сайт. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/> (дата обращения: 02.03.25).

Hydrometcenter of Russia. Official Website. (In Russ.).

9. Горчаковский П.Л., Иванова Л.А. Оценка состояния и прогноз антропогенной динамики растительного покрова особо охраняемых природных территорий на основе фитоэкологического картографирования // Экология. 2008. Т. 39, № 4. С. 243–252.

Gorchakovskii P.L., Ivanova L.A. Assessment of the State of Vegetation and Prognosis of Its Anthropogenic Dynamics in Specially Protected Nature Areas on the Basis of Phytocological Mapping. *Ekologia* = Russian Journal of Ecology, 2008, vol. 39, pp. 229–237. <https://doi.org/10.1134/S1067413608040012>

10. Зверев А.А. Методические аспекты применения фитоиндикационного анализа в изучении биоразнообразия // Сиб. экол. журн. 2020. Т. 20, № 4. С. 401–415. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200401>

Zverev A.A. Methodological Aspects of Using Indicator Values in Biodiversity Analysis. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2020, vol. 13, iss. 4, pp. 321–332. <https://doi.org/10.1134/S1995425520040125>

11. Зверев А.А., Шереметова С.А., Шереметов Р.Т. Шкала гемероботолерантности растений как инструмент для анализа флористических данных в рамках бассейнового подхода // Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов: сб. материалов докл. V Междунар. конф. Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2018. С. 20–26.

Zverev A.A., Sheremetova S.A., Sheremetov R.T. Plant Indicator Values of Tolerability for Hemeroby as an Analytical Tool for Floristic Data Using the Basin Approach. *Problems of Industrial Botany in Advanced Industrial Regions: Proceedings of the 5th International Conference*. Kemerovo, FIC UUH SO RAN Publ., 2018, pp. 20–26. (In Russ.).

12. Казанская Н.С., Ланина В.В., Марфенин Н.Н. Рекреационные леса. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 96 с.

Kazanskaya N.S., Lanina V.V., Marfenin N.N. *Recreational Forests*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 96 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2480.1769>

13. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Зеленая инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2020. 324 с.

Klimanova O.A., Kolbovskiy E.Yu., Illarionova O.A. *City Green Infrastructure: State Assessment and Development Design*. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2020. 324 p. (In Russ.).

14. Красная книга Красноярского края: в 2 т. Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / Н.В. Степанов, Е.М. Антипова, С.В. Антипова, Е.Б. Андреева, В.А. Бакалин, И.А. Горбунова, Д.М. Данилина, Ю.А. Иваненко, М.Е. Коновалова, Л.А. Конорева, Л.В. Кривобоков, И.Ю. Кром, О.Е. Крючкова, Ю.В. Кулешова, А.В. Пименов, Д.Ю. Полянская, И.Н. Пospelов, Е.Б. Пospelова, Ю.А. Ребриев, А.Е. Сонникова, Н.Н. Тупицына, И.Н. Урбанавичене, Г.П. Урбанавичюс, В.Э. Федосов, А.Г. Федосова, И.П. Филиппова, С.В. Чесноков, Д.Н. Шауло, А.Г. Ширяев, Ф.С. Юзефович, И.Е. Ямских; отв. ред. Н.В. Степанов; Красноярск: СФУ, 2022. 762 с.

Stepanov N.V., Antipova E.M., Antipova S.V., Andreyeva E.B., Bakalin V.A., Gorbunova I.A., et al. *Red Data Book of the Krasnoyarsk Territory*: In 2 Vol. Vol. 2. The Rare and Endangered Species of Plants and Fungi. Ed. by N.V. Stepanov. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2022. 762 p. (In Russ.).

15. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / отв. ред.: д-р биол. наук Д.В. Гельтман. М.: Экология, 2024. 944 с.

Red Data Book of the Russian Federation. Plants and Fungi. Ed. by D.V. Gel'tman. Moscow, Ekologiya Publ., 2024. 944 p. (In Russ.).

16. Махлаев М.Л., Неустроева М.В., Демьяненко Т.Н., Перфилова О.Ю., Стрижа Т.П., Спиридонова Э.В., Карнаухова О.М. «Долгая Грива»: межвузовский полигон ландшафтно-экологического мониторинга: природные комплексы, геология, прогноз развития / под ред. М.В. Неустроевой. Красноярск: КГПУ им. В.П. Астафьева, 2014. 272 с.

Makhlayev M.L., Neustroyeva M.V., Dem'yanenko T.N., Perfilova O.Yu., Strizha T.P., Spiridonova E.V., et al. *"Dolgaya Griva": Interuniversity Test Area for Landscape and Ecological Monitoring: Natural Complexes, Geology, Development Forecast*. Ed. by M.V. Neustroyeva. Krasnoyarsk, KSPU named after V.P. Astafyev Publ., 2014. 272 p. (In Russ.).

17. МКЭО «Гремячая грива» // Емельяновские вести: официальный сайт газеты, 2022. 183 с. Режим доступа: <https://emelyanovskievesti.ru/news/informirovanie-naseleniya-o-razrabotke-materialov-kompleksnogo-ekologicheskogo-obsledovaniya-uchastka-territorii/> (дата обращения: 25.02.25).

Materials on Comprehensive Ecological Survey of "Gremyachaya Griva". *Newspaper "Emelyanovskie Vesti"*. Official Website. 2022. 183 p. (In Russ.).

18. Оптимизация рекреационного лесопользования / отв. ред. Л.П. Рысин. М.: Наука, 1990. 120 с.

Optimization of Recreational Forest Management. Ed. by L.P. Rysin. Moscow, Nauka Publ., 1990. 120 p. (In Russ.).

19. Отмахов Ю.С., Черникова Т.С., Третьяков Б.А. Антропогенная трансформация растительных сообществ сосновых лесов в городской среде // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2018. № 41. С. 75–95.

Otmakhov Yu.S., Chernikova T.S., Tretyakov B.A. Anthropogenic Transformation of Vegetation in Urban Pine Forests. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2018, no. 41, pp. 75–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/41/5>

20. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас-определитель растений и лишайников России и сопредельных стран. 2007–2025. Режим доступа: <http://www.plantarium.ru> (дата обращения: 30.04.25).

Plantarium. Plants and Lichens of Russia and Neighboring Countries: Open Online Galleries and Plant Identification Guide. 2007–2025. (In Russ.).

21. Тарасов А.И. Рекреационное лесопользование. М.: Агропромиздт, 1986. 176 с.
Tarasov A.I. *Recreational Forest Management*. Moscow, Agropromizdtd Publ., 1986. 176 p. (In Russ.).

22. Флора Сибири: В 14 т. / под ред. д-ров биол. наук, проф. Л.И. Малышева, Г.А. Пешковой. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990–наст. вр.

Flora of Siberia: In 14 Vol. Ed. by L.I. Malyshev, G.A. Peshkova. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1990–present time. (In Russ.).

23. Ценофонд лесов Европейской России: база данных. Режим доступа: <https://cepl.rssi.ru/bio/flora/ecogroup.html?ysclid=mnfyhfdism117013840> (дата обращения: 30.04.25).

The Forest Resource Inventory of European Russia: A Database. (In Russ.).

24. Чижова В.П. Рекреационные ландшафты: устойчивость, нормирование, управление: моногр. Смоленск: Ойкумена, 2011. 176 с.

Chizhova V.P. *Recreational Landscapes: Sustainability, Regulation, and Management*: Monograph. Smolensk, Oykumena Publ., 2011. 176 p. (In Russ.).

25. Эбель А.Л., Зверев А.А. Эколого-ценотический анализ флоры северо-западной части Алтае-Саянской флористической провинции // Бюл. МОИП. Отд. биол. 2023. Т. 128, вып. 5. С. 85–92.

Ebel A.L., Zverev A.A. Ecological-Cenotic Analysis of the Flora of the North-Western Part of the Altai-Sayan Floristic Province. *Byulleten' Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody Otdel Biologicheskii* = Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series, 2023, vol. 128, iss. 5, pp. 85–92. (In Russ.).

<https://doi.org/10.55959/MSU0027-1403-BB-2023-128-5-85-92>

26. den Ouden J. *The Role of Bracken (Pteridium aquilinum) in Forest Dynamics*. PhD Thesis. Wageningen, Netherlands, Wageningen University, 2000. 218 p.

<https://doi.org/10.18174/197082>

27. Emelyanov A.V., Frolova S.V. Ash-Leaf Maple (*Acer negundo* L.) in Coastal Phytocenoses of the Vorona River. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2011, vol. 2, iss. 2, art. 161. <https://doi.org/10.1134/S2075111711030052>

28. Gómez-Baggethun E., Barton D.N. Classifying and Valuing Ecosystem Services for Urban Planning. *Ecological Economics*, 2013, vol. 86, pp. 235–245.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>

29. Hamberg L., Malmivaara-Lämsä M., Lehvävirta S., O'Hara R.B., Kotze D.J. Quantifying the Effects of Trampling and Habitat Edges on Forest Understory Vegetation – A Field Experiment. *Journal of Environmental Management*, 2010, vol. 91, iss. 2, pp. 1811–1820. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.003>

30. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 2001, vol. 4, iss. 1, art. 4. 9 p.

31. Oikonomakis N.G., Ganatsas P. Secondary Forest Succession in Silver Birch (*Betula pendula* Roth) and Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Southern Limits in Europe, in a Site of Natura 2000 Network – An Ecogeographical Approach. *Forest Systems*, 2020, vol. 29, iss. 1, p. e010. <https://doi.org/10.5424/fs/2020292-15680>

32. Sikorska D., Sikorski P., Archiciński P., Chormański J., Hopkins R.J. You Can't See the Woods for the Trees: Invasive *Acer negundo* L. in Urban Riparian Forests Harms Biodiversity and Limits Recreation Activity. *Sustainability*, 2019, vol. 11, iss. 20, art. 5838. <https://doi.org/10.3390/su11205838>

33. Sokolova G.G. Influence of Recreation on the Forest Ecosystems of Altai Region Low Lands. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2019, no. 9(3), pp. 399–401.

https://doi.org/10.15421/2019_115

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare 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*24

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-82-94

Математическая модель отбора деревьев с учетом заданной абсолютной полноты насаждения при проведении рубок ухода

Г.Э. Рего¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AFX-5848-2022](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2235-8113>

О.И. Григорьева², 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. Григорьев³✉, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

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

В.П. Друзьянова⁴, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

Е.Ю. Матвиенко⁵, канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6767-315X>

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; regogr@yandex.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✉

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, д. 58, ул. Белинского, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru

⁵Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А. Кортунова, д. 111, ул. Пушкинская, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Россия, 346428; zhikalena11@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.25 / Одобрена после рецензирования 19.05.2025 / Принята к печати 21.05.2025

Аннотация. В лесном хозяйстве есть понятие «абсолютная полнота насаждения» – сумма площадей поперечных сечений всех деревьев насаждения на высоте 1,3 м в пересчете на 1 га. В настоящее время все большее распространение получает технология лидарной подеревной съемки лесных массивов, результатами которой становятся в т. ч. данные о координатах деревьев и их диаметрах. Эти данные позволяют вычислить полноту насаждения. При планировании снижения абсолютной полноты древостоя во время проведения рубок ухода в однородном насаждении требуется сделать оптимальный выбор назначаемых в рубку деревьев, чтобы достичь плановой полноты и при этом обеспечить максимально возможное жизненное пространство для оставляемых деревьев. Представлена постановка задачи отбора деревьев для рубок ухода, предполагающая сохранение заданной доли полноты насаждений при одновременном обеспечении равномерного пространственного распределения оставшихся деревьев. Целью работы является разработка математической модели оптимального отбора деревьев в рубку как системы поддержки принятия решений для повышения эффективности рубок ухода. Для решения задачи предлагается генетический алгоритм, использующий результаты подеревной лидарной съемки насаждения, в котором каждое дерево кодируется двоичным вектором, а целевая функция сочетает максимизацию суммарных попарных расстояний и штрафы за нарушение ограничений по планируемой полноте насаждения и минимальному расстоянию между оставляемыми на доращивание деревьями. Рас-



смотрено теоретическое обоснование сложности задачи и показано, что в общем случае она является NP-трудной. Предложенный подход успешно апробирован на реальных данных подеревной лидарной съемки, что подтверждает его эффективность и практическую применимость в лесном хозяйстве.

Ключевые слова: генетический алгоритм, абсолютная полнота насаждения, снижение абсолютной полноты, заданная абсолютная полнота, равномерность расположения деревьев, комбинаторная оптимизация, метаэвристика, лидарная съемка насаждения, рубки ухода, оставление деревьев

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

Для цитирования: Рего Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Друзянова В.П., Матвиенко Е.Ю. Математическая модель отбора деревьев с учетом заданной абсолютной полноты насаждения при проведении рубок ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 82–94. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-82-94>

Original article

A Mathematical Model for Tree Selection That Accounts for a Specified Absolute Stand Density During Improvement Thinning Operations

Grigorij E. Rego¹, *Candidate of Engineering*; ResearcherID: [AFX-5848-2022](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2235-8113>

Olga I. Grigoreva², *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. Grigorev³, *Doctor of Engineering, Prof.*; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Varvara P. Druzyanova⁴, *Doctor of Engineering, Prof.*; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

Elena Yu. Matvienko⁵, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.*;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6767-315X>

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Russia, 185910;
regogr@yandex.ru

²Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, Russia, 194021; grigoreva_o@list.ru

³Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoye, 3-y km, 3, Yakutsk, Russia, 677007; silver73@inbox.ru

⁴North-Eastern Federal University in Yakutsk, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, Russia, 677000;
druzvar@mail.ru

⁵Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, ul. Pushkinskaya, 111, Novocherkassk, Rostov Region, Russia, 346428; zhikalenal1@mail.ru

Received on March 25, 2025 / Approved after reviewing on May 19, 2025 / Accepted on May 21, 2025

Abstract. There is a concept in forestry known as “absolute stand density” – the sum of the cross-sectional areas of all trees in the stand at a height of 1.3 meters, converted to 1 hectare. Currently, LIDAR tree survey mapping technology for forest areas is becoming increasingly

widespread. It provides data on tree coordinates and diameters, as well as other information. This data enables the calculation of stand density. Designing a reduction in the absolute stand density during improvement thinning operations in a uniform stand needs to make an optimal selection of trees to be harvested in order to achieve the target density while ensuring the maximum possible growing space for the remaining trees. This paper presents a problem of selecting trees for improvement thinning operations, which aims to maintain a specified stand density while ensuring an even spatial distribution of the remaining trees. The research aims at developing a mathematical model for the optimal selection of trees for harvesting as a decision support system to improve the efficiency of improvement thinning operations. We propose a genetic algorithm to solve this problem. The genetic algorithm uses the results of tree survey LiDAR scanning of the stand. In the algorithm, each tree is encoded as a binary vector, and the target function combines the maximization of total pairwise distances with penalties for violating constraints on the planned stand density and the minimum distance between trees left for further growth. When planning to reduce the absolute completeness of the plantation, during logging of forest maintenance, in a homogeneous plantation, it is necessary to make the optimal choice of trees assigned to logging in order to achieve the planned completeness, and at the same time provide the maximum possible living space for the trees left for rearing. The article presents the formulation of the problem of selecting trees for logging, assuming the preservation of a given proportion of the completeness of plantings while ensuring a uniform spatial distribution of the remaining trees. The aim of the work is to develop a mathematical model of optimal tree selection as a decision support system to improve the efficiency of logging due to the optimal choice of trees to be removed. To solve the problem, a genetic algorithm is proposed that assumes the results of a sub-tree LIDAR survey of the plantation, in which each tree is encoded by a binary vector, and the objective function combines maximizing the total pairwise distances and penalties for violating restrictions on the planned completeness of the plantation and the minimum distance between trees left to grow. The theoretical justification for the complexity of the problem is discussed, and it is shown that, in the general case, it is NP-hard. The proposed approach has been successfully tested on real-world tree survey LiDAR data, confirming its effectiveness and practical applicability in forestry.

Keywords: genetic algorithm, absolute stand density, reduction in absolute stand density, target absolute stand density, evenness of tree distribution, combinatorial optimization, meta-heuristics, LiDAR stand surveying, improvement thinning, retention of trees

Funding: The research was carried out within the framework of the scientific school “Innovative Solutions in Logging Industry and Forest Management” and funded by the Russian Science Foundation Grant No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Rego G.E., Grigorieva O.I., Grigoriev I.V., Druzyanova V.P., Matvienko E.Yu. A Mathematical Model for Tree Selection That Accounts for a Specified Absolute Stand Density During Improvement Thinning Operations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 82–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-82-94>

Введение

Задачи отбора деревьев для лесохозяйственных мероприятий, основанные на критериях оптимизации расположения оставляемых насаждений, широко применимы в лесном деле [3, 5–7]. В частности, при проведении выборочных рубок часто ставится задача снизить абсолютную полноту (сумму площадей поперечных сечений стволов в пересчете на 1 га) насаждения до некоторого уровня, при этом сохранить как можно более равномерное распределение оставшихся деревьев [4]. Такая постановка задачи свойственна для рубок ухода разных видов, например, рубок обновления. В дальнейшем решаемая задача может

быть адаптирована под определенные цели, включая повышение эстетической привлекательности парков, обеспечение противопожарных разрывов и т. п.

Исходными данными для решения подобной задачи могут стать результаты лидарного сканирования насаждения, содержащие сведения о координатах мест произрастания деревьев, их диаметрах и породной принадлежности, позволяющие в т. ч. выполнять дистанционный мониторинг состояния насаждения [9, 11, 12, 18].

Рассматриваемая задача тесно связана с классической задачей максимального разнообразия (Maximum Diversity Problem) [23], в которой из набора объектов требуется выбрать подмножество так, чтобы суммарные попарные расстояния между элементами были наибольшими из возможных. Отличие заключается в том, что помимо максимизации «разнообразия» (равномерности расположения), необходимо учесть ограничение на снижение абсолютной полноты насаждения, а значит, удалять (или оставлять) деревья с учетом их диаметра [15, 16]. При этом равномерность формализуется как стремление увеличить средние расстояния между оставшимися деревьями либо как максимизация суммы попарных расстояний / минимального расстояния. Таким образом, задача усложняется по сравнению с классической задачей максимального разнообразия, поскольку к критерию «разнообразия» добавляются прикладные лесохозяйственные требования. В классической задаче максимального разнообразия число выбираемых объектов заранее задано [22].

Полнота насаждения является значимым показателем при проведении рубок ухода [14]. При лесоустроительных работах определяют как абсолютную, так и относительную полноту [1, 2]. Абсолютная полнота – это фактическая сумма площадей сечений деревьев на 1 га. Относительная полнота – отношение абсолютной полноты данного насаждения к полноте нормального насаждения (с полнотой 1,0). Обычно при определении абсолютной полноты используют данные перечета деревьев по диаметрам на пробных площадях или круговых площадках. Определение относительной полноты может проводиться глазомерно. Согласно Лесоустроительной инструкции, относительная полнота должна определяться с погрешностью не более $\pm 0,1$, но данные лидарной подеревной съемки насаждения позволяют при помощи компьютерного алгоритма вычислять полноту с большей точностью [17].

До перехода на интенсивную модель лесного хозяйства при оценке качества и эффективности рубок ухода использовалась относительная полнота. В настоящее время в Правилах ухода за лесами для расчета доли вырубki древостоя и интенсивности рубок ухода используют абсолютную полноту. Например, С.Н. Сеннов для расчетов брал именно абсолютную полноту, которая наиболее точно отражает структуру древостоя [15].

Установление абсолютной полноты положено в основу составления программ рубок ухода, которые могут быть представлены как в табличной, так и в графической форме. Контроль абсолютной полноты позволяет следить за количеством вырубаемой части древесины и не выходить за пределы допустимых значений, заданных в Таблицах хода роста древостоев [4].

Для каждой породы можно построить график изменения суммы площадей сечений (абсолютной полноты) в зависимости от возраста древостоя (рис. 1). Красная линия на номограмме рис. 1 отображает минимальные абсолютные полноты. При вырубке части древостоя снижают полноту, но оставши-

еся на доразраживание деревьев за счет уменьшения конкуренции за свет и почвенные ресурсы увеличивают энергию роста. Это позволяет им повышать прирост и восстановить абсолютную полноту насаждения и, когда это происходит, можно опять провести рубку [8]. Следует установить норму суммы площадей сечений к возрасту рубки спелых и перестойных насаждений и таким образом контролировать интенсивность и повторяемость рубок ухода.

Целью работы является разработка математической модели оптимального отбора деревьев в рубку как системы поддержки принятия решений для повышения эффективности рубок ухода.

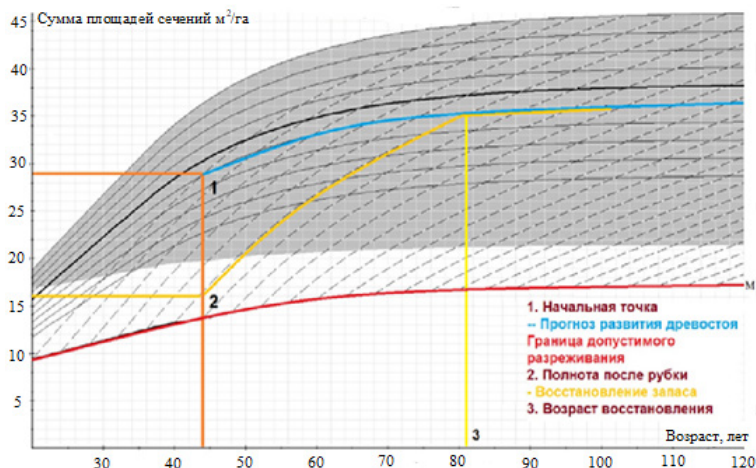


Рис. 1. Пример номограммы для проектирования рубок ухода за лесом

Fig. 1. A nomogram example for designing forest improvement thinning operations

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стали материалы подеревной съемки лесного массива в Республике Татарстан (пригород г. Набережные Челны). Объем выборки составил 1000 деревьев. Пример данных подеревной съемки (координаты, порода, диаметр) представлен на рис. 2.

№ точки	X, м	Y, м	Порода дерева	Диаметр D, м
1	482139,554	2323853,05	береза	0,25
2	482137,96	2323857,75	береза	0,40
3	482140,336	2323857,165	береза	0,25
4	482138,238	2323861,457	береза	0,40
5	482144,11	2323854,802	береза	0,30
6	482144,424	2323857,75	береза	0,14
7	482143,52	2323860,03	береза	0,13
8	482146,198	2323861,843	береза	0,40
9	482144,815	2323870,337	береза	0,50
10	482142,006	2323868,766	береза	0,35
11	482141,191	2323868,92	береза	0,25
12	482137,513	2323873,953	береза	0,40
13	482137,248	2323877,902	береза	0,15
14	482138,982	2323878,909	береза	0,40
15	482138,02	2323882,103	береза	0,30

Рис. 2. Пример результатов подеревной съемки, используемых при моделировании

Fig. 2. An example of the tree survey results used in modeling

Результаты исследования и их обсуждение

Формальная постановка задачи. Пусть задано множество деревьев $V = \{v_1, \dots, v_n\}$. Каждое дерево $v_i \in V$ имеет координаты (x_i, y_i) в некоторой локальной системе координат, радиус r_i и принадлежит к определенной породе. Суммарная площадь поперечных сечений всех деревьев S_1 в пределах участка составляет начальную полноту насаждения. Обозначим долю площади сечения деревьев, которую необходимо оставить на доращивание, как $0 \leq \Delta \leq 1$. Требуется вырубить подмножество деревьев так, чтобы площадь поперечного сечения оставленных на доращивание деревьев (в пересчете на 1 га) была в пределах $\Delta S_1 \pm 0,05 S_1$ га.

Решение задачи представлено в виде последовательности бинарных переменных $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, где $z_i = 1$ означает, что дерево i остается на доращивание, а $z_i = 0$ – что дерево i вырубается. Площадь сечения дерева i обозначим как $A_i = \pi r_i^2$. Тогда требуемое снижение полноты можно задать как

$$\Delta S^1 - 0,05 S^1 \leq \sum_{i=1}^n A_i z_i \leq \Delta S^1 + 0,05 S^1. \quad (1)$$

Таким образом, общее количество (по сумме площадей) вырубаемых деревьев должно быть не меньше $(1 - \Delta - 0,05) S_1$. Дополнительно необходимо обеспечить требуемую «равномерность» расположения оставляемых деревьев. Для этого равномерность формализуется как нижняя граница δ на расстояние между любыми 2 оставленными деревьями. Для каждой пары деревьев $i \neq j$ вводится расстояние $d(i, j)$ между их центрами. Тогда условие, что если оба дерева остаются, то расстояние между ними не меньше δ , можно записать следующим образом: для каждой пары деревьев $(i, j) : i \neq j$ вводится ограничение

$$d(i, j) + \delta(1 - z_i z_j) \geq \delta. \quad (2)$$

Если $z_i z_j = 1$, то деревья i, j не вырубятся. Из этого неравенства вытекает $d(i, j) \geq \delta$. Если хотя бы 1 из деревьев вырублено ($z_i z_j = 0$), то ограничение выполняется автоматически из-за дополнительного слагаемого δ . Таким образом, равномерность задается не как дополнительная цель, а как жесткое ограничение: все оставшиеся деревья должны находиться друг от друга на расстоянии не меньше δ .

Целевую функцию при таком подходе можно задать как максимизацию суммарных попарных расстояний между оставшимися деревьями, что позволяет обеспечить максимальное жизненное пространство. Пусть вес w_{ij} определяется как $w_{ij} = d(i, j) - r_i - r_j$, чтобы учесть при расчетах радиусы стволов деревьев. Тогда целевая функция может быть записана как

$$\max \sum_{1 \leq i < j \leq n} w_{ij} z_i z_j. \quad (3)$$

Если необходимо, чтобы ограничения строго соблюдались, то можно использовать модель, описанную выражениями (1)–(3).

Однако на практике возникают ситуации, когда жестко заданные ограничения не могут быть выполнены. Чтобы это учесть, необходимо ввести в целе-

вую функцию модели штрафные члены. Пусть Λ_1 и Λ_2 – коэффициенты штрафа за несоблюдение ограничения на очищаемую от деревьев площадь и на минимальное расстояние между деревьями соответственно. Тогда итоговая функция может выглядеть так:

$$F(z) = \sum_{1 \leq i < j \leq n} w_{ij} z_i z_j - \Lambda_1 \phi(z) - \Lambda_2 \psi(z) \rightarrow \max, \quad (4)$$

$$\text{где } \phi(z) = \max \left\{ 0, \left| \sum_{i=1}^n A_i z_i - \Delta S_1 \right| - 0,05 S_1 \right\}, \quad \psi(z) = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \max \{0, \delta - d(i, j)\} z_i z_j.$$

Величина $\phi(z)$ становится положительной, если суммарная площадь поперечного сечения оставленных деревьев выходит за допустимые пределы, описанные формулой (1). В этом случае модель наказывает решение штрафом $\Lambda_1 \phi(z)$. Аналогично $\psi(z)$ суммирует все недостаточно большие расстояния по сравнению с δ в парах оставшихся деревьев. Если среди дорастиваемых деревьев есть такие, расстояние между которыми меньше δ , то $\delta - d(i, j)$ положительно; тогда решение также штрафует на $\Lambda_2 \psi(z)$ за каждую «слишком близкую» пару деревьев. Согласно формуле (4), штрафы задаются по отдельности, но на практике они чаще всего равны и при проведении экспериментов будем придерживаться пропорции 1/1.

Анализ вычислительной сложности показывает, что описанная задача является NP -трудной. Уже задача выбора подмножества вершин, максимизирующего сумму попарных расстояний, без дополнительных ограничений не допускает полиномиального времени решения при условии, что $P \neq NP$ [10, 20]. Включение ограничений на суммарные площади (или суммарные диаметры) удаляемых деревьев и на минимальное расстояние между оставшимися деревьями еще более усложняет постановку, поскольку добавляются нелинейные элементы с переменными z_i и условиями вида (2). Поэтому не существует вычислительно эффективного точного алгоритма, гарантирующего глобальный оптимум для большинства значений n . В реальных приложениях прибегают к метаэвристикам и эвристикам (жадному методу [13], генетическим алгоритмам [20], алгоритмам муравьиной колонии, или роя пчел [19, 21], и пр.), которые позволяют находить хорошие субоптимальные решения за приемлемое время. Опишем одну из таких эвристик ниже.

Генетический алгоритм для решения задачи. Генетические алгоритмы – это класс метаэвристических методов оптимизации, основанных на принципах, сходных с эволюционными механизмами естественного отбора. При применении к описанной в предыдущем разделе задаче особь (решение задачи) кодируется двоичным вектором $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, где каждая позиция указывает на оставление ($z_i = 1$) или удаление ($z_i = 0$) дерева. Функция приспособленности $F(z)$ определяется заданной целевой функцией (4), включающей критерий равномерного размещения деревьев и штрафа за нарушение лесохозяйственных ограничений. Целевую функцию необходимо максимизировать – чем больше ее значение, тем выше приспособленность особи. Операция кроссовера выполняет обмен фрагментов 2 особей, формируя особи-потомки. Для рассматриваемой постановки задачи будет использоваться одноточечный кроссовер с точкой скре-

щивания, равной целой части числа от частного $\frac{n}{2}$, где n – число деревьев. Мутация случайным образом изменяет некоторые биты (0 на 1 или 1 на 0), чтобы увеличить разнообразие и избежать преждевременной сходимости.

Вход:

Множество деревьев $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ с радиусом $r_i \rightarrow v_i$ и площадью поперечного сечения $A_i = \pi r_i^2$.

Суммарная площадь сечений S_1 , составляющая начальную полноту насаждения.

Параметр Δ (доля деревьев, которую нужно оставить на доращивание), $0 \leq \Delta \leq 1$.

Порог δ – минимально допустимое расстояние между любыми 2 оставленными деревьями.

Параметры штрафов Λ_1 и Λ_2 .

Параметры генетического алгоритма:

popSize – размер популяции (будем подразумевать, что **popSize** – четное число для упрощения формирования особей-потомков);

maxGen – максимальное число поколений;

p_c – вероятность кроссовера, будем считать ее равной 1;

p_{mt} – вероятность мутации, примем ее за 0,01.

Выход:

Множество вершин (деревьев) $V' \subset V$, которые остаются на доращивание в соответствии с вектором $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$.

Значение целевой функции (4), учитывающей суммарное расстояние (с поправкой на радиусы) и штрафы за нарушения.

Начало алгоритма.

Шаг 1. Сформировать начальную популяцию особей P размера **popSize**. Инициализацию можно сделать случайной (каждый z_i равен 1 с вероятностью Δ и 0 с вероятностью $1 - \Delta$). Текущее число поколений задать равным 1.

Шаг 2. Для каждой особи z из P вычислить значение ее функции приспособленности (4).

Шаг 3. Пока текущее число поколений меньше **maxGen** или не достигнуты другие критерии останова, выполнять Шаги 4–8.

Шаг 4. Из текущей популяции отобрать пары особей для размножения. Мы будем пользоваться методом рулетки [24] на основе значений функции приспособленности (4). Число пар для размножения равно $\frac{\text{popSize}}{2}$.

Шаг 5. Для каждой пары родителей $(z(p_1), z(p_2))$ осуществить обмен частями генов, формируя потомков.

Шаг 6. Для каждого потомка и каждого его гена $z_{i,k}$ с вероятностью p_{mt} поменять 0 на 1 или 1 на 0. Это помогает сохранить «генетическое разнообразие».

Шаг 7. Для полученных потомков вычислить значение функции приспособленности (4).

Шаг 8. Объединить потомков и родителей в новое поколение размером **popSize** особей. Отбор особей в новое поколение также будет выполняться при помощи метода рулетки. Увеличить текущее число поколений на 1.

Шаг 9. По окончании заданного числа поколений или при достижении стабильности значений функции приспособленности (например, несколько поколений подряд значение функции приспособленности лучшей особи не возрастает) выбрать особь $z' = (z'_1, z'_2, \dots, z'_n)$ с наибольшим значением функции приспособленности (4). Индексы $i:z'_i$ образуют искомое множество деревьев $V' \subset V$, которые остаются на дорастивание. Значение функции приспособленности $F(z')$ определяет суммарное расстояние (с учетом радиусов), а штрафы $\Lambda_1\phi(z)$ и $\Lambda_2\psi(z)$ учитывают отклонения от целевых ограничений.

Конец алгоритма.

Апробация генетического алгоритма для решения задачи. Апробация разработанного генетического алгоритма проводилась на базе реальных данных перечетной ведомости, содержащей координаты и диаметры деревьев в лесном массиве. Сначала исходная выборка была очищена от аномальных значений (например, ошибочно больших диаметров) и преобразована в числовой формат, что позволило корректно учитывать координаты и радиусы. Далее для каждого дерева были вычислены вспомогательные показатели: площадь поперечного сечения, а также параметры для оценки расстояний (евклидового и с поправкой на радиусы деревьев).

После подготовки данных алгоритм запускался с фиксированными параметрами: размер популяции $\text{popSize} = 20$, максимальное число поколений $\text{maxGen} = 30$, вероятности кроссовера $p_m = 1$ и мутации $p_{mt} = 0,01$, коэффициенты штрафа $\Lambda_1 = 1000$, $\Lambda_2 = 1000$. Цель состояла в том, чтобы поддерживать нужный уровень полноты насаждений (заданный долей $\Delta = 0,6$ с допустимым отклонением $\pm 0,05S_1$) и одновременно максимизировать суммарное расстояние между оставшимися деревьями, задавая нижнюю границу $\delta = 20$ м для расстояния между деревьями. Начальная популяция генерировалась случайным образом, где каждое дерево в насаждении представляло собой набор бинарных переменных $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, определяющих оставление или удаление дерева.

На каждом поколении проводилась оценка деревьев в насаждении $F(z)$ с учетом штрафных слагаемых за нарушение ограничений по площади (полноте) и расстояниям. Лучшие деревья в насаждении выбирались методом рулетки, что позволило сохранить генетическое разнообразие популяции и избежать слишком ранней сходимости к локальному максимуму. Затем применялись кроссовер и мутация, поддерживающие вариативность решений. При достижении заданного числа поколений либо при отсутствии улучшения за несколько итераций алгоритм останавливался.

Для оценки результатов алгоритма (рис. 3) использовалось финальное значение целевой функции. Кроме того, визуализировалось расположение деревьев: оставленные деревья выделялись цветом, что давало возможность наглядно оценить равномерность итогового распределения. При увеличении штрафов (Λ_1 , Λ_2) решения более строго соблюдали целевую полноту и дистанцию, однако иногда это несколько снижало суммарную оценку расстояний. Вряде запусков наблюдалось, что уже к середине итерационного процесса (30–50 % от maxGen) алгоритм находил решение, близкое к лучшему по достигнутому значению функции приспособленности.

Таким образом, апробация показала, что предложенный генетический алгоритм способен эффективно решать задачу поиска подмножества деревьев в насаждении для оставления на доращивание, удовлетворяя лесохозяйственным ограничениям. Метод корректно реагирует на изменения параметров Δ , δ , Λ_1 , Λ_2 и при должном подборе величин штрафа и вероятностей генетических операторов достигает сбалансированного решения, где одновременно учитываются требования к полноте насаждений и к равномерности расположения оставленных деревьев.

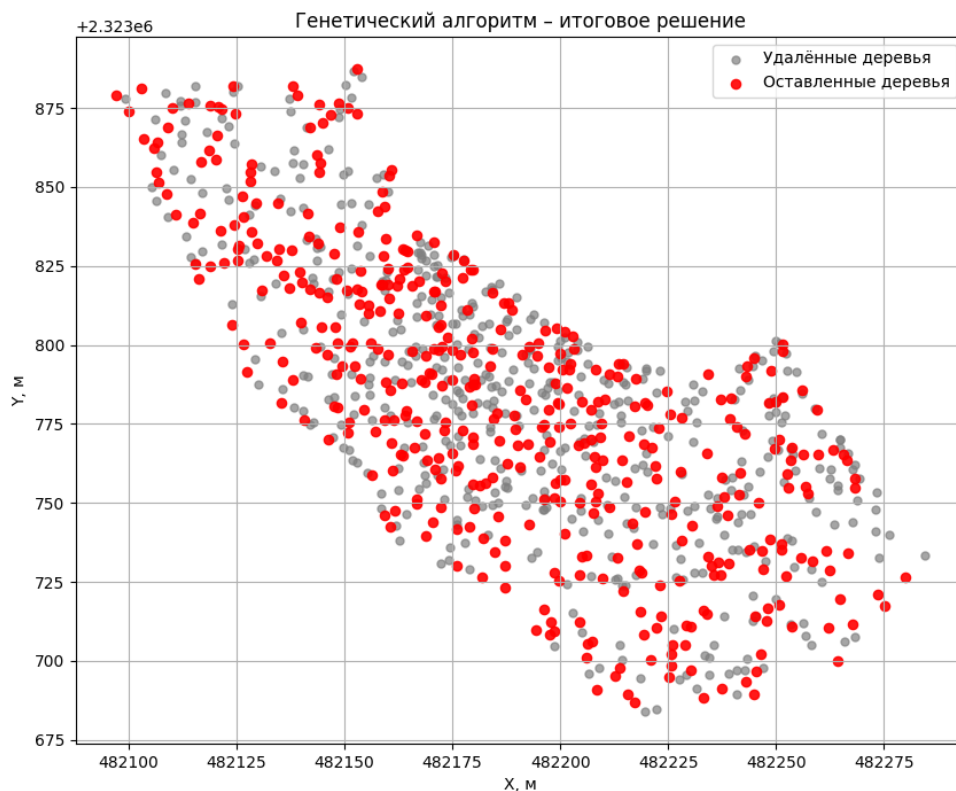


Рис. 3. Результат работы генетического алгоритма

Fig. 3. The genetic algorithm performance

Заключение

Таким образом, описанный подход к отбору деревьев на основе генетического алгоритма показывает высокую эффективность при решении задачи снижения абсолютной полноты насаждения с сохранением равномерности расположения оставшихся деревьев. Модель, включающая штрафные члены за отклонения от заданного уровня полноты и минимально допустимого расстояния, позволяет учитывать реальные лесохозяйственные ограничения. Результаты эксперимента с использованием данных подеревной съемки подтверждают, что метод позволяет находить сбалансированные решения за оптимальное время, корректно реагируя на изменения параметров Δ , δ , Λ_1 , Λ_2 , а также на число поколений и размер популяции в алгоритме. Дальнейшее развитие работы может включать исследование более сложных критериев равномерности, а также ин-

теграцию дополнительных факторов (породный состав, экономические показатели и т. д.) для формирования комплексных планов ведения лесного хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляева Н.В. Зональные особенности возобновления ели в условиях Ленинградской области // Науч. обозрение. 2012. № 5. С. 97–106.

Belyaeva N.V. Zonal Peculiarities of Spruce Reforestation in Leningrad Region Conditions. *Nauchnoye obozreniye*, 2012, no. 5, pp. 97–106. (In Russ.).

2. Беляева Н.В., Грязькин А.В. Закономерности появления подроста ели после сплошных рубок в зависимости от состава материнского древостоя // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2015. № 41. С. 3–7.

Beliaeva N.V., Gryazkin A.V. Patterns of Spruce Regeneration Following Final Thinning, Depending on the Parent Stand Composition. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2015, no. 41, pp. 3–7. (In Russ.).

3. Богачев П.В., Григорьева О.И. Контроль качества и эффективности рубок ухода по нормативам интенсивной модели лесного хозяйства в Тихвинском лесничестве Ленинградской области // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 16–19.

Bogachev P.V., Grigoreva O.I. Quality Control and Efficiency of Logging Care According to the Standards of the Intensive Forestry Model in the Tikhvin Forestry of the Leningrad Region. Current Issues in Forestry and Wood Processing: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, KSTU Publ., 2023, pp. 16–19. (In Russ.).

4. Богачев П.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.А. Использование абсолютной полноты как критерия качества проведения рубок ухода // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Петрозаводск. гос. ун-т, 2023. С. 40–41.

Bogachev P.V., Grigoreva O.I., Grigorev G.A. The Use of Basal Area per Hectare as a Quality Standard for Improvement Thinning Operation. *Improving the Efficiency of the Forest Complex: Proceedings of the 9th All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation*. Petrozavodsk, PSU Publ., 2023, pp. 40–41. (In Russ.).

5. Григорьева О.И., Панарин А.О. Перспективные пути повышения эффективности рубок ухода в молодняках // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 70–73.

Grigoreva O.I., Panarin A.O. Promising Ways to Improve the Efficiency of Felling Care in Young Stands. *Current Issues in Forestry and Wood Processing: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, KSTU Publ., 2023, pp. 70–73. (In Russ.).

6. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н. Лесоводственная эффективность равномерно-постепенных рубок в условиях Вологодской области // Лесохоз. информ. 2013. № 2. С. 40–44.

Druzhinin N.A., Druzhinin F.N. Silvicultural Efficiency of Even Gradual Cutting in the Vologda Region Conditions. *Forestry information*, 2013, no. 2, pp. 40–44. (In Russ.).

7. Дружинин Н.А., Неволин Н.Н. О выборочных рубках в осушаемых ельниках // Гидролесомелиорация и эффективное использование земель лесного фонда. Информационные материалы. Вологда, 1998. С. 243–248.

Druzhinin N.A., Nevolin N.N. On Selective Logging in Drained Spruce Forests. *Reclamation Hydroforestry Reclamation and Efficient Use of Forest Lands. Information Materials*. Vologda, 1998, pp. 243–248. (In Russ.).

8. Коротюк О.М. Значение и проблемы рубок ухода // Тр. Братск. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и инженер. науки – развитию регионов Сибири. 2009. Т. 1. С. 142–147.

Korotyuk O.M. Importance and Problems of Improvement Thinning. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri*, 2009, vol. 1, pp. 142–147. (In Russ.).

9. Коршунов Н.А., Савченкова В.А., Перминов А.В., Конюшенков М.Е. Перспективные направления применения беспилотных авиационных систем в лесном комплексе // Лесохоз. информ. 2022. № 2. С. 34–46.

Korshunov N.A., Savchenkova V.A., Perminov A.V., Konyushenko M.E. Promising Areas of Application of Unmanned Aircraft Systems in the Forest Complex. *Forestry information*, 2022, no. 2, pp. 34–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.03>

10. Кружилин С.Н., Барышникова Е.В., Мишенина М.П. Методика статистической обработки результатов лесокультурных исследований с использованием ППП MATHCAD // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 3(35). С. 56–67.

Kruzhilin S.N., Baryshnikova E.V., Mishenina M.P. Methodology for Statistical Processing of the Sylvicultural Research Results Using Mathcad Application Package. *Forestry Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 3(35), pp. 56–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.3/56>

11. Кружилин С.Н., Ищенко О.С., Багдасарян А.А. Мониторинг дубрав в условиях нижнего Дона (на примере Донлесхоза) // Наука. Мысль: электрон. периодич. журн. 2017. Т. 7, № 7. С. 35–39.

Kruzhilin S.N., Ischenko O.S., Bagdasaryan A.A. Monitoring of Dubravs Under the Conditions of the Lower Don (on the Example of Donleskhoz). *Nauka. Mysl: electronic periodical journal*, 2017, vol. 7, no. 7, pp. 35–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.25726/нмэнж.в7и7.7>

12. Кружилин С.Н., Чернышков Д.В. Методика исследования географических культур дуба черешчатого // Человек. Общество. Природа. Международный сборник научно-практических работ / под ред. В.С. Кукушина. Ростов-на-Дону: ГинГо, 2011. С. 308–312.

Kruzhilin S.N., Chernyshkov D.V. Research Method for Provenance Trial Plantations of English Oak. *Man. Society. Nature. International Collection of Academic and Practical Papers*. Ed. by V.S. Kukushin. Rostov-on-Don, GinGo Publ., 2011, pp. 308–312. (In Russ.).

13. Рего Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Воронова А.М., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 38–50.

Rego G.E., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Voronova A.M., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. A Mathematical Model of Tree Selection in a Homogeneous Plantation During Improvement Thinning. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 38–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-38-50>

14. Русинов Д.Э. Разработка алгоритма назначения лесохозяйственных мероприятий по уходам за лесами // Научному прогрессу – творчество молодых. 2020. № 2. С. 145–148.

Rusinov D.E. Development of an Algorithm for Assigning Forestry Measures for Forest Care. *Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodykh*, 2020, no. 2, pp. 145–148. (In Russ.).

15. Сеннов С.Н. Динамика еловых древостоев разного происхождения // Лесоведение. 1992. № 1. С. 3–10.

Sennov S.N. Dynamics of Spruce Stands of Different Origin. *Lesovedenie* = Forest science, 1992, no. 1, pp. 3–10. (In Russ.).

16. Сеннов С.Н. Итоги экспериментального изучения конкуренции в древостоях // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 1993. № 11. С. 160–172.

Sennov S.N. The Results of an Experimental Study of Competition in Stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicoskoj akademii*, 1993, no. 11, pp. 160–172. (In Russ.).

17. Сидоренков В.М., Астапов Д.О., Бадак Л.А., Ачиколова Ю.С. Возможности таксации лесов на основе данных радиолокационной спутниковой съемки на примере ленточных боров Алтайского края // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 19-й Междунар. конф. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 379.

Sidorenkov V.M., Astapov D.O., Badak L.A., Achikolova Yu.S. Radar Satellite Survey Data Based on Forest Inventory Opportunities (Case Study of Altai Territory Ribbon Forests). *Modern Issues of Remote Sensing of the Earth from Space: Proceedings of the 19th International Conference*. Moscow, IKI RAS Publ., 2021. 379 p. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21046/19DZZconf-2021a>

18. Степанова Д.С., Савченкова В.А. Мониторинг состояния зеленых насаждений // Охрана, инновационное восстановление и устойчивое управление лесами. Forestry – 2023: материалы Междунар. лесн. форума. Воронеж: ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2023. С. 164–172.

Stepanova D.S., Savchenkova V.A. Planting Observation. *Protection, Advance Restoration and Sustainable Forest Management. Forestry – 2023. Proceedings of the International Forestry Forum*. Voronezh, VGLTU Publ., 2023, pp. 164–172. (In Russ.).

https://doi.org/10.58168/Forestry2023_164-172

19. Alaidi A.H., Der C.S.S., Leong Y.W. Systematic Review of Enhancement of Artificial Bee Colony Algorithm Using Ant Colony Pheromone. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 2021, vol. 15, no. 16, pp. 172–180.

<https://doi.org/10.3991/ijim.v15i16.24171>

20. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A Review on Genetic Algorithm: Past, Present, and Future. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, pp. 8091–8126.

<https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>

21. Kuo C.-C., Glover F., Dhir K.S. Analyzing and Modeling the Maximum Diversity Problem by Zero-One Programming. *Decision Sciences*, 1993, vol. 24, iss. 6, pp. 1171–1185.

<https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1993.tb00509.x>

22. Martí R., Martínez-Gavara A., Pérez-Peló S., Sánchez-Oro J. A Review on Discrete Diversity and Dispersion Maximization from an OR Perspective. *European Journal of Operational Research*, 2022, vol. 299, iss. 3, pp. 795–813.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.044>

23. Parreño F., Álvarez-Valdés R., Martí R. Measuring Diversity. A Review and an Empirical Analysis. *European Journal of Operational Research*, 2021, vol. 289, iss. 2, pp. 515–532. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.07.053>

24. Shukla A., Pandey H.M., Mehrotra D. Comparative Review of Selection Techniques in Genetic Algorithm. *2015 International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE)*. Greater Noida, India, 2015, pp. 515–519.

<https://doi.org/10.1109/ABLAZE.2015.7154916>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare 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*182.47:581.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-95-109

Формирование травяно-кустарничкового яруса в нарушенных уссурийским полиграфом насаждениях подтаежно-лесостепного района

С.К. Мамедова¹, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-6484-2022](https://orcid.org/0000-0001-9972-0021),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9972-0021>

А.А. Вайс¹✉, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-7051-2019](https://orcid.org/0000-0003-4965-3670),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-3670>

Г.С. Вараксин², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>

А.И. Мельник¹, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABF-0738-2022](https://orcid.org/0000-0002-1673-1639),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1673-1639>

¹Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; mamedova_seva@mail.ru, vais6365@mail.ru✉, aleksandrana2013@gmail.com

²Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; varaksins@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.25 / Одобрена после рецензирования 16.07.25 / Принята к печати 17.07.25

Аннотация. Оценена фитомасса травяно-кустарничкового яруса в насаждениях, нарушенных вследствие массовой вспышки полиграфа уссурийского (*Polygraphus proximus* Blandford) в 2012–2014 гг. В ходе полевых работ 2024 г. установлено, что напочвенная растительность под пологом чистых пихтовых и смешанных насаждений произрастает в затухающих очагах инвайдера. Таксацию древостоя и учет травяно-кустарничкового яруса проводили на 28 пробных площадях. Сплошной пересчет деревьев осуществляли на ленточных пробах. Отдельно учитывали усохшие деревья, в т. ч. пихты, поврежденные уссурийским полиграфом, а также ослабленные, зараженные данным инвайдером. На территории выявлено 62 вида растений травяно-кустарничкового яруса, доминирующими из которых являются представители 29 семейств покрытосеменных (85,5 %). Представлены видовой состав травяно-кустарничкового яруса, его фитомасса, суммарное проективное покрытие, конверсионные коэффициенты в зависимости от доли отпада деревьев. Выявлена зависимость показателей травяно-кустарничкового яруса от полноты древостоя и степени нарушенности. Данные связи адекватно описывались экспоненциальной функцией. Отмечено преобладание крупнотравно-папоротниковой и злаковой растительности. Для прогнозирования пожарной опасности определили влагосодержание травяно-кустарничкового яруса. Оно составляло в среднем 81,7 %. Живые (вегетирующие) растения задерживают горение из-за высокой постоянной влажности, а отмершие (опад, травяная ветошь) являются проводниками горения. В очагах, где проведены санитарные рубки, наблюдалось максимальное накопление травяно-кустарничкового яруса (454 г/м²), что создает пожарную опасность и снижает интенсивность лесовозобновления. Изучение напочвенного покрова позволяет прогнозировать возможность восстановления темнохвойных пород в условиях воздействия полиграфа уссурийского.

Ключевые слова: уссурийский полиграф, *Polygraphus proximus* Blandford, инвайдер, лесной вредитель, травяно-кустарничковый ярус, проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса, живой напочвенный покров, фитомасса живого напочвенного покрова, ослабление древостоя, нарушенный древостой, подтаежно-лесостепной район

Благодарности: Исследование проводилось в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» (№ FEFE-2024-0029) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем» СибГУ им. М.Ф. Решетнёва.

Для цитирования: Мамедова С.К., Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мельник А.И. Формирование травяно-кустарничкового яруса в нарушенных уссурийским полиграфом насаждениях подтаежно-лесостепного района // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 95–109. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-95-109>

Original article

Herb and Subshrub Layers Development Among Forest Plantations Disturbed by the Four-Eyed Fir Bark Beetle in the Subtaiga Forest-Steppe Zone

Sevinch K. Mamedova¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [ABB-6484-2022](https://orcid.org/0000-0001-9972-0021),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9972-0021>

Andrey A. Vais^{1✉}, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-7051-2019](https://orcid.org/0000-0003-4965-3670),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-3670>

Gennady S. Varaksin², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>

Alexandra I. Melnik¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [ABF-0738-2022](https://orcid.org/0000-0002-1673-1639),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1673-1639>

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, Russia, 660037; mamedova_ceva@mail.ru, vais6365@mail.ru✉, aleksandrana2013@gmail.com

²V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, ul. Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, Russia, 660036; varaksings@mail.ru

Received on April 20, 2025 / Approved after reviewing on July 16, 2025 / Accepted on July 17, 2025

Abstract. The article provides an evaluation of the herb and subshrub layer phytomass in forests disturbed by the widespread outbreak of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in 2012–2014. Field studies carried out in 2024 found that the ground cover vegetation grows in pure fir and mixed stands where the pest population started to decline. Stand valuation and inventory of the herb and subshrub layers were performed on 28 sample plots. Tree measurements were carried out on strip plots. Separate records were kept of dead trees; including firs damaged by the four-eyed fir bark beetle and weakened trees infected by the pest. A total of 62 plant species were identified in the herb and subshrub layers within the study area. The ground cover vegetation is dominated by angiosperms (85.5 %), representing 29 families. The research presents the species composition of the herb and subshrub layers, their phytomass, total foliage cover, and conversion coefficients depending on the tree mortality rate. A correlation has been identified between the parameters of the herb

and subshrub layers and the tree stand density and disturbance degree. These relationships were adequately described by the means of an exponential function. A predominance of tall grasses, ferns, and cereal crops is observed. The moisture content of the herb and subshrub layers was measured in order to predict the fire risks. The mean average was found to be 81.7 %. Living (vegetative) plants have a high moisture content, which limits the fire propagation. In contrast, dead plants, such as litter and dry vegetation, are highly combustible. The greatest volumes of the herb and subshrub layer vegetation were observed (454 g/m²) in outbreak areas where environmental harvesting was carried out. Studying the ground cover vegetation provides an opportunity to predict the recovery potential of dark coniferous forests affected by the four-eyed fir bark beetle.

Keywords: four-eyed fir bark beetle, *Polygraphus proximus* Blandford, invasive species, forest pest, herb and subshrub layers, foliage cover of herb and subshrub layers, living ground cover, phytomass of living ground cover, stand degradation, disturbed stand, subtaiga forest-steppe region

Funding: The research was carried out as part of a state-funded project commissioned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation titled “Dynamics of Regeneration of Central Siberia Taiga Forests Disturbed by Insect Pests” (No. FEFE-2024-0029) by the team of the “Forest Ecosystems” Research Laboratory at the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

For citation: Mamedova S.K., Vais A.A., Varaksin G.S., Melnik A.I. Herb and Subshrub Layers Development Among Forest Plantations Disturbed by the Four-Eyed Fir Bark Beetle in the Subtaiga Forest-Steppe Zone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 95–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-95-109>

Введение

Полиграф уссурийский (*P. proximus*) – это насекомое-дендрофаг дальневосточного происхождения, который появился в таежных экосистемах Сибири в 2000-е гг. [14]. В настоящее время он считается опасным стволовым вредителем пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.).

В Красноярском крае в ходе дистанционного лесопатологического мониторинга 2014 г. на момент основной вспышки обнаружены повреждения пихтарников на площади 49,9 тыс. га [1]. Формирование очагов массового размножения инвазионного короеда приводит как к качественному, так и к количественному изменению структуры пихтовых древостоев [9, 23, 25]. Это, в свою очередь, вызывает значительные изменения в составе и структуре живого напочвенного покрова [20].

Очаги полиграфа уссурийского в крае приурочены к пихтарникам разнотравным и разнотравно-зеленомошным с примесью ели (*Picea obovata* Ledeb.), березы (*Betula pendula* Roth) и осины (*Populus tremula* L.) с полнотой 0,5–0,7 [3]. Массовое нашествие короеда в аналогичных фитоценозах способствует дальнейшему снижению сомкнутости крон и увеличению площади окон в древесном пологе, т. к. здоровые деревья ослабевают, поражаясь грибами-паразитами, превращаются в сухостой и валеж. Отпад деревьев в очагах размножения инвайдера может достигать 99,8 % [12, 13]. Это явление приводит к мозаичному размещению напочвенных компонентов фитоценозов: неперегнившего растительного опада, мохового и травяно-кустарничкового ярусов [21].

В поврежденных фитоценозах пихтовой формации [21], а также на вырубках, пройденных в очаге инвайдера, отмечается доминирование высокотравных

и крупнопоротниковых видов растительности. Ее разрастание снижает естественное возобновление темнохвойных лесов и повышает пожарную опасность [2, 18, 22].

Исследованиями травяно-кустарничкового яруса в нарушенных энтомоповрежденными насаждениях занимались многие ученые: Е.О. Бакшеева и др., [2], А.Г. Дюкарев и др. [10], В.Д. Перевозникова, Ю.Н. Баранчиков [16], И.В. Фуряев, С.В. Жила [19], С.А. Кривец и др. [24]. Однако следует отметить, что до настоящего времени неясны процессы формирования растительности напочвенного покрова после воздействия уссурийского полиграфа.

Цель исследования – определить закономерности формирования травяно-кустарничкового яруса в насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири, поврежденных полиграфом уссурийским.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в 2024 г. в нарушенных полиграфом уссурийским насаждениях (очаги затухающие), а также на участках сплошных санитарных рубок и полностью погибших древостоев. Ранее массовая вспышка энтомоповреждителя на данных участках наблюдалась в 2012–2014 гг.

Насаждения, произрастающие в подтаежно-лесостепном районе Средней Сибири, характеризуются разным породным составом: пихта (*Abies sibirica* Ledeb.), ель (*Picea obovata* Ledeb.), кедр (*Pinus sibirica* Du Tour), лиственница (*Larix sibirica* Ledeb.), сосна (*Pinus sylvestris* L.), береза (*Betula pendula* Roth) и осина (*Populus tremula* L.).

Полевые работы выполняли на 28 пробных площадях, заложенных в виде лент размером 10×30 или 10×50 м², и 3 круговых площадках с радиусом 15 м в условиях полного распада древостоя и низкой проходимости в связи со значительным количеством крупных древесных остатков, лежащих на земле. Сплошной пересчет деревьев осуществляли на ленточных пробах. Отдельно фиксировали усохшие деревья, в т. ч. пихты, поврежденные уссурийским полиграфом, а также ослабленные заражением данным инвайдером. У 20–50 учетных деревьев, относящихся к разным ступеням толщины и породам, измеряли высоту с построением диаграмм. Лесоводственно-таксационную оценку выполняли в соответствии с классическим методом описания основных показателей древостоев [4].

Учет надземной фитомассы травяно-кустарничкового яруса проводили методом укусов [6]. Учетные площадки 0,20×0,25 м² ограничивали через каждые 5 м. Количество площадок на пробной площади составляло 5 шт., всего за полевой сезон – 140 шт. Все растения на площадках срезали ножницами на уровне поверхности почвы и сортировали по группам: травы, папоротники, хвощи, кустарнички.

Дополнительно в пределах каждой пробной площади определяли видовой состав [15], проективное покрытие и высоту травяно-кустарничкового яруса. Его эколого-ценотический анализ проводили камеральным способом при помощи сайта «Плантариум» [17]. Виды распределяли на экологические группы: по отношению к влаге (мезофит, мезогигрофит, гигрофит), питанию (олигомезотроф, мезотроф, мезоэвтроф, эвтроф), свету (гелиофит, факультативный гелиофит, сциофит).

В лабораторных условиях травяно-кустарничковый ярус взвешивали в воздушно-сухом состоянии. Влажность растений устанавливали по потере массы навески при ее высушивании в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 6–8 ч. После этого рассчитывали фитомассу травяно-кустарничкового яруса в абсолютно сухом состоянии.

Все количественные показатели (проективное покрытие, высота, фитомасса, влагосодержание) травяно-кустарничкового яруса обработаны в программах Microsoft Excel и SPSS Statistics.

Результаты исследования и их обсуждение

На объектах исследования выявлено 62 вида растений травяно-кустарничкового яруса. Значительную часть составляли покрытосеменные (85,5 %), относящиеся к 29 семействам.

Ведущие 10 семейств покрытосеменных растений включали 36 видов (58,1 %), остальные представлены единично. Среди них преобладали семейства Poaceae – 9,7 %, Ranunculaceae – 8,1 %; Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae и Rosaceae – по 6,5 %; Ericaceae – 4,8 %; Boraginaceae, Caryophyllaceae, Lamiaceae – по 3,2 %.

Доминировали представители отдела Папоротниковидные – 12,9 % (8 шт.). Например, голокучник трехраздельный (*Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman), кочедыжник женский (*Athyrium filix-femina* (L.) Roth), орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), пузырник ломкий (*Cystopteris fragilis* (L.) Bernh.), страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris* (L.) Tod.), фегоптерис связывающий (*Phegopteris connectilis* (Michx.) Watt), щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott) и щитовник широкий (*Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenk. & Jermy). Отдел Хвощевидные включал единственный вид – хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.).

Встречались 3 вида кустарничков: линнея северная (*Linnaea borealis* L.), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.).

Всего лесных видов зафиксировано 32,3 %, луговых – 1,6 %, видов, относящихся как к лесным, так и к луговым растениям, – 66,1 %.

Анализ распределения видов по отношению к водному режиму показал преобладание мезофитных растений – 59,7 %. Мезогигрофитов выявлено 33,9 %, а гигрофитов – 6,5 %.

По отношению к трофности почв репрезентативность мезотрофной группы более высокая и составляла 56,5 %. На долю мезоэвтрофов приходилось 27,4 %, эвтрофов – 11,3 %, олигомезотрофов – 4,8 %.

Гелиофитов насчитывалось 24,2 %, факультативных гелиофитов – 61,3 %, а сциофитов – 14,5 %.

Таким образом, исследование экологических групп видового состава травяно-кустарничкового яруса показало преобладание влаголюбивых и теневыносливых растений, произрастающих на почвах с умеренным содержанием питательных веществ (табл. 1).

В составе подлеска, оказывающего влияние на травяно-кустарничковый ярус, встречались смородина (*Ribes rubrum* L.), спирея (*Spiraea media* Schmidt), малина (*Rubus idaeus* L.) и жимолость (*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn).

Таблица 1

Экологические группы травяно-кустарничкового яруса
Environmental groups of the herb and subshrub layers

По отношению к влаге	Количество видов		По отношению к питанию	Количество видов		По отношению к свету	Количество видов	
	шт.	%*		шт.	%*		шт.	%
Мезофит	37	59,7	Олигомезотроф	3	4,8	Гелиофит	15	24,2
Мезоги- грофит	21	33,9	Мезотроф	35	56,5	Факультатив- ный гелиофит	38	61,3
Гигрофит	4	6,4	Мезоэвтроф	17	27,4	Сциофит	9	14,5
			Эвтроф	7	11,3			
Итого	62	100	Итого	62	100	Итого	62	100

*В пределах экологической группы.

В табл. 2 представлены таксационная характеристика древостоев и фито-масса травяно-кустарничкового яруса в абсолютно сухом состоянии.

Таблица 2

Таксационно-лесоводственные показатели объекта исследования
Inventory and forestry parameters of the studied forest stands

ПП	Состав древостоя	Тип леса	ΣG , м ² /га	P	$M_{др}$, м ³ /га	Отпад деревьев, %	$M_{тка}$, г/м ²
1	7ПЗОс+Б	П _{пкт}	23,63	0,76	220	8,1	148±27,70
2	5Ос4П1Бед.Е	Ос _{рт}	23,00	0,69	246	82,9	172±49,42
3	5П4Б1Осед.К,Е	П _{рт}	28,58	1,12	214	53,0	143±65,79
4	Погибший древостой с единичным мелким подростом					100,0	240±52,43
5	5Б4П1К+Е	Б _{кт}	17,42	0,77	149	57,2	243±47,95
6	6ПЗЕ1Б+К	П _{рт}	22,25	0,78	203	15,7	252±33,78
7	3СЗПЗОс1Б+К	С _{рт}	30,82	0,81	335	4,2	129±40,07
8	4С4Б1Л+Пед.К	С _{рт}	56,32	1,45	639	0	152±32,83
9	5БЗП2Сед.К	Б _{осрт}	39,39	1,38	360	5,4	58±14,31
10	5Ос4Б1Пед.К	Ос _{крт}	43,18	1,05	463	3,1	63±17,39
11	5П4Б1Ос	П _{кт}	23,05	0,58	214	0,0	136±38,49
12	4Ос4П2Б	Ос _{осрт}	27,98	0,78	269	0,2	64±11,08
13	Сплошная санитарная рубка после воздействия поли- графа, единичный мелкий подрост					100,0	454±64,13
14						100,0	290±51,13
15	8Ос2Б+П	Ос _{осрт}	42,65	1,07	526	0	121±9,44
16	7Ос2Б1П	Ос _{рпп}	28,05	0,71	316	0	78±8,01
17	6Б2Л1Е1П+Осед.К	Б _{пктхв}	27,92	0,88	281	29,7	341±55,99
18	4Б4С1Е1П+К	Б _{осрт}	41,07	1,23	464	10,0	72±11,30
19	5КЗБ2Е+П	К _{злхвк}	19,03	0,39	171	76,8	266±31,82

Окончание табл. 2

ПП	Состав древостоя	Тип леса	ΣG , м ² /га	P	$M_{др}$, м ³ /га	Отпад деревьев, %	$M_{тка}$, г/м ²
20	6Ос3П1Б	Ос _{рп}	47,76	1,47	430	0,9	92±29,98
21	5Б4П+С,Л,Ос+Е	Б _{осрт}	36,75	1,17	322	8,0	53±6,36
22	7Б3П+Е	Б _{кп}	32,95	1,02	296	4,6	132±23,99
23	7П2С1Ос+К	П _{рп}	29,16	0,91	315	48,9	201±26,62
24	7П2Ос1Б+Е	П _{прт}	23,50	0,71	176	45,8	121±9,64
25	6П2Л1С+К,Осед.Е	П _{рп}	36,19	1,10	409	11,0	100±13,68
26	10П	П _{кпкт}	25,36	0,80	228	18,3	245±55,73
27	10П	П _{пкт}	23,13	0,72	255	14,1	204±14,82
28	7П3Лед.Ос	П _{рп}	13,17	0,36	128	91,2	222±18,97

Примечание: ПП – пробная площадь. ΣG – сумма площадей поперечных сечений, м²/га; P – относительная полнота; $M_{др}$ – запас древесины, м³/га; $M_{тка}$ – фитомасса травяно-кустарничкового яруса в абсолютно сухом состоянии, г/м². П_{кт}, П_{пкт}, П_{рт}, П_{рп}, П_{прт}, П_{кпкт} – пихтач крупнотравный, папоротниково-крупнотравный, разнотравный, разнотравно-папоротниковый, папоротниково-разнотравный, кустарниково-папоротниково-крупнотравный соответственно; С_{рт} – сосняк разнотравный; Б_{кт}, Б_{осрт}, Б_{кп}, Б_{пктхв} – березняк крупнотравный, осочково-разнотравный, крупнотравно-папоротниковый и папоротниково-крупнотравно-хвощевый соответственно; Ос_{рт}, Ос_{кп}, Ос_{осрт}, Ос_{рп} – осинник разнотравный, кустарниково-разнотравный, разнотравный, осочково-разнотравный и разнотравно-папоротниковый соответственно; К_{злхвк} – кедрач злаково-хвощево-кустарниковый.

В различных насаждениях отпад деревьев по запасу древесины составлял от 0 до 100 %, а отпад пихты, вызванный заселением полиграфа уссурийского, изменялся от 0 до 99,3 %. Доля ослабленных из-за заражения данным лесным инвайдером деревьев в пихтовом элементе насаждений достаточно велика: по запасу – от 0 до 67,6 %, что может значительно снижать устойчивость данной породы и обуславливать возникновение просветов в пологе.

Подрост пихты встречался единично в местах полного отпада древостоя (ПП-4; ПП-13–14) и сильно поврежденных насаждениях, что говорит о слабом возобновлении леса.

Анализ лесоводственно-таксационных материалов позволил констатировать заметную тесноту связи фитомассы в абсолютно сухом состоянии травяно-кустарничкового яруса с абсолютной (ΣG) и относительной полнотой древостоя, запасом древесины, а также долей отпада деревьев ($M_{отп}$).

Установленные связи наиболее адекватно описываются экспоненциальной функцией с высокими значениями коэффициентов детерминации и выравнивания (рис. 1, 2):

$$M_{тка} = 319,5e^{-0,029 \Sigma G}, R^2 = 0,53, r = 0,73;$$

$$M_{тка} = 3,1546e^{-0,942 P_{отп}}, R^2 = 0,47, r = 0,69;$$

$$M_{тка} = 270,25e^{-0,002 M_{др}}, R^2 = 0,39, r = 0,62;$$

$$M_{тка} = 104,76e^{0,0106 M_{отпад}}, R^2 = 0,46, r = 0,68.$$

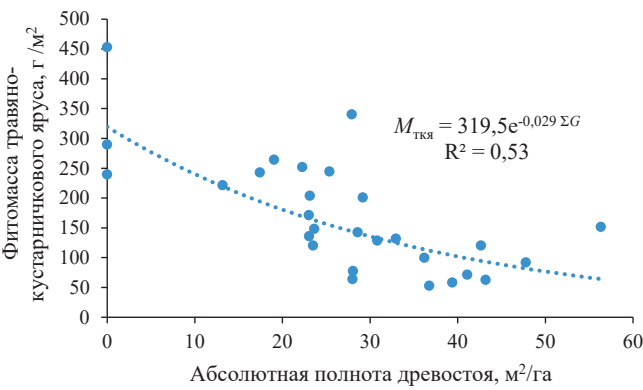


Рис. 1. Связь фитомассы травяно-кустарничкового яруса и абсолютной полноты древостоя

Fig. 1. Correlation between the phytomass of the herb and subshrub layers and the absolute stand density

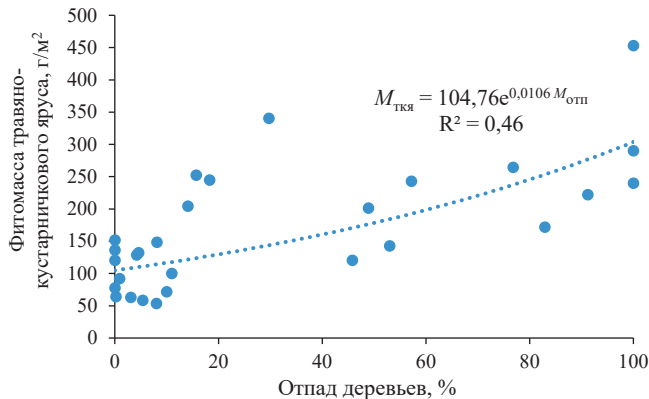


Рис. 2. Связь фитомассы травяно-кустарничкового яруса и отпада деревьев

Fig. 2. Correlation between the phytomass of the herb and subshrub layers and tree mortality rate

На основе рис. 1 можно утверждать, что с увеличением абсолютной полноты древостоя фитомасса травяно-кустарничкового яруса снижается. Это связано в первую очередь с тем, что на формирование растительного яруса значительное влияние оказывает уровень освещенности биотопа, изменяющийся в результате сукцессионного развития лесных фитоценозов.

По сведениям [7, 8, 11], в темновойных насаждениях надземная фитомасса травяно-кустарничкового яруса варьирует в пределах от 31,5 до 448 г/м², что сопоставимо с данными наших полевых исследований.

В табл. 3 приведены средние значения абсолютно сухой фитомассы травяно-кустарничкового яруса в зависимости от группы насаждений с различной относительной полнотой.

Таблица 3

Средняя фитомасса травяно-кустарничкового яруса при различной относительной полноте древостоя
Average parameters of the phytomass of the herb and subshrub layers at different relative stand densities

Полнота насаждения	Относительная полнота	Количество пробных площадей, шт.	Фитомасса* травяно-кустарничкового яруса, г/м²	Конверсионный коэффициент, т/м³
Высокая	0,80 и более	14	136±20,7	0,0043
Средняя	0,50–0,79	8	158±21,0	0,0076
Низкая	0,30–0,49	3	243±15,0	0,0164

*В абсолютно сухом состоянии.

Конверсионные коэффициенты (К) показывают среднее количество фитомассы (т) травяно-кустарничкового яруса в 1 м³ древесины. Исходное значение вычисляли по формуле:

$$K = M_{\text{ткя}} / M_{\text{др.}}$$

Вследствие изменения светового и теплового режимов под кронами основного яруса в нарушенных насаждениях наблюдалось ощутимое изменение видового состава травяно-кустарничкового яруса и его запасов. Крупнотравная (борец северный *Aconitum septentrionale* Koelle, скерда сибирская *Crepis sibirica* L., бодяк девясиловидный *Cirsium helenioides* (L.) Hill, недоселка копьевидная *Parasenecio hastatus* (L.) Н. Коуама и др.) и злаковая растительность (бор развесистый *Milium effusum* L., разные виды вейника *Calamagrostis* и мятлика *Poa*) были хорошо развиты.

Необходимо отметить, что травы и кустарнички относятся к основным проводникам горения [5]. Их абсолютно сухая фитомасса составляла более 200 г/м²

- в местах полного отпада деревьев ПП-4 или сплошных санитарных рубок ПП-13–14;

- в пихтачах разнотравном ПП-6 и разнотравно-папоротниковом ПП-23, кустарничково-папоротниково-крупнотравном ПП-26, папоротниково-крупнотравном ПП-27 и разнотравно-папоротниковом ПП-28;

- в кедраче злаково-хвощево-кустарниковом ПП-19;

- в березняках крупнотравном ПП-5 и папоротниково-крупнотравно-хвощевом ПП-17.

Это означает, что на сплошных санитарных рубках и в аналогичных типах леса (ПП-4–6, ПП-13–14, ПП-17, ПП-19, ПП-23, ПП-26–28) высока вероятность распространения горения в пожароопасный период, т. к. после таяния снега накопится значительная масса опада (травяной ветоши).

Минимальные запасы травяно-кустарничкового яруса зафиксированы:

- в осинниках кустарничково-разнотравном ПП-10, осочково-разнотравном ПП-12 и разнотравно-папоротниковом на ПП-16 и ПП-20;

- в березняке осочково-разнотравном на ПП-9, ПП-18 и ПП-21.

Для прогнозирования пожарной опасности в нарушенных участках леса вычислили влагосодержание травяно-кустарничкового яруса в июле. Оно составляло в среднем 81,7 %.

Следует отметить, что живые (вегетирующие) растения травяно-кустарничкового яруса задерживают горение из-за высокой постоянной влажности, а отмершие (опад, травяная ветошь) – являются проводниками горения.

В табл. 4 и 5 сведены данные травяно-кустарничкового яруса. Его видовой состав на каждой пробной площади количественно менялся от 11 до 24 шт., средняя высота варьировала от 0,2 до 1,2 м. Суммарное проективное покрытие находилось в диапазоне от 70 до 185 %. Проективное покрытие достигало более 100 % в связи с 4-ярусностью растительного покрова: 1-й ярус – мелкотравье (кислица *Oxalis acetosella* L., майник *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt, мителла *Mitella nuda* L. и др.); 2-й ярус – среднетравье (осока *Carex macroura* Meinsh., вороний глаз *Paris quadrifolia* L., седмичник *Trientalis europaea* L., медуница *Pulmonaria mollis* Wulfen ex Hornem., горошек *Vicia cracca* L., костяника *Rubus saxatilis* L., черемша *Allium victorialis* L. и др.); 3-й – крупнотравье и злаки (борец, недоселка, лабазник *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., бодяк,

скерда, борщевик *Heracleum dissectum* Ledeb., вейник лесной *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, бор развесистый и др.); 4-й – папоротники (кочедыжник, щитовник, страусник и др.). Несмотря на низкую высоту травяного покрова, состоящего из кислицы обыкновенной и майника двулистного, его проективное покрытие достигало 20 %, в среднем – 8,4 %. Ведущий представитель среднетравья – осока большехвостая – имела проективное покрытие до 50 %, в среднем – 19 %. Среди злаковых растений особую роль играл вейник лесной, проективное покрытие которого достигало 95 %, при средней величине 36 %. Его высота достигала 1,2 м. Значительно уступал ему в проективном покрытии бор развесистый, который составлял в среднем 1,6 %. Наличие данных злаковых видов указывает на повышенную влажность почвы. Применительно к крупнотравью можно утверждать о доминировании борца северного с высотой до 1,2 м и проективным покрытием до 50 %, в среднем – 20 %. Среди папоротников преобладал кочедыжник женский (проективное покрытие до 50 %, в среднем – 18 %).

Абсолютно сухая фитомасса трав была в пределах от 20 до 453 г/м², папоротников – от 1 до 72 г/м², хвощей – от 6 до 80 г/м², а кустарничков – 35 г/м². В целом на объектах исследования надземная фитомасса травяно-кустарничкового яруса изменялась в пределах от 53 до 454 г/м².

Таблица 4

Количественные данные для травяно-кустарничкового яруса ПП 1–14
Quantitative data for the herb and subshrub layers of the sample plots ПП 1–14

Группа	Показатель	ПП													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Травы	Суммарное проективное покрытие, %	99	119	125	138	157	167	138	165	95	90	152	112	175	132
	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	102	172	143	209	230	252	128	152	58	59	136	64	453	290
Папоротники	Суммарное проективное покрытие, %	40	20	10	2	7	5	22	–	–	20	2	2	3	–
	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	47	–	–	9	8	–	1	–	–	4	–	–	1	–
Хвощи	Суммарное проективное покрытие, %	2	2	2	5	20	–	–	–	–	–	1	1	–	–
	Масса в сыром состоянии, г/м ²	–	–	–	117	31	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	–	–	–	21	6	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Травяно-кустарничковый ярус	Суммарное проективное покрытие, %	141	141	137	145	185	172	160	165	95	110	155	115	178	132
	Количество видов, шт.	13	15	17	11	21	13	21	20	16	13	20	18	13	15
	Средняя высота, м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	1,0	0,3	1,2	0,6
	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	148	172	143	240	243	252	129	152	58	63	136	64	454	290

Таблица 5

Количественные данные для травяно-кустарничкового яруса ПП 15-28
Quantitative data for the herb and subshrub layers of the sample plots ПП 15-28

Группа	Показатель	ПП														
		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
Травы	Суммарное проективное покрытие, %	133	85	105	72	62	40	70	116	109	87	135	124	134	164	
	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	121	66	315	72	185	20	51	128	149	77	85	186	179	222	
	Суммарное проективное покрытие, %	2	40	51	1	1	30	12	20	42	80	30	55	50	21	
Папоротники	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	–	12	13	–	1	72	2	4	18	44	15	58	25	14	
	Суммарное проективное покрытие, %	–	–	20	–	80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Хвои	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	–	–	13	–	80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
	Суммарное проективное покрытие, %	–	–	–	–	3	–	–	–	4	1	–	–	–	–	
Кустарнички	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	–	–	–	–	–	–	–	–	35	–	–	–	–	–	
	Суммарное проективное покрытие, %	135	125	176	73	146	70	82	136	156	168	165	179	184	185	
Травяно-кустарничко- вый ярус	Количество видов, шт.	22	24	21	17	15	19	19	20	17	21	22	11	23	24	
	Средняя высота яруса, м	0,4	0,4	1,2	0,3	0,7	0,5	0,2	0,8	0,5	0,6	0,5	1,2	1,0	0,8	
	Масса в абсолютно сухом состоянии, г/м ²	121	78	341	72	266	92	53	132	201	121	100	245	204	222	

Установлена взаимосвязь абсолютно сухой фитомассы травяно-кустарничкового яруса с его суммарным проективным покрытием (рис. 3). Так, в условиях значительного проективного покрытия травянистых растений (>100 %) эта корреляционная связь позволяет ориентировочно определять их общую фитомассу.

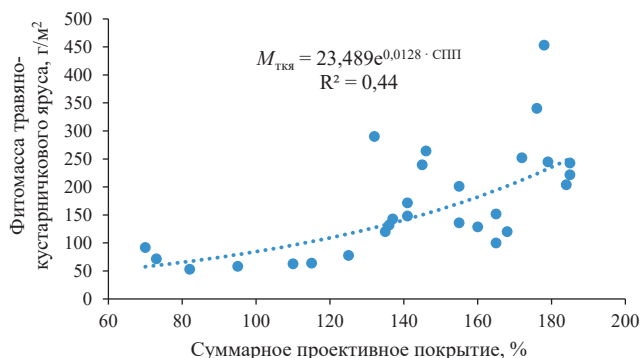


Рис. 3. Взаимосвязь фитомассы травяно-кустарничкового яруса с суммарным проективным покрытием (СПП)

Fig. 3. Correlation between the phytomass of the herb and subshrub layers and total foliage cover (СПП)

Выводы

1. В зараженных энтомовредителями как чистых, так и смешанных насаждениях разного породного состава злаково-папоротниково-крупнотравных (разнотравных) формаций наблюдалось преобладание фитомассы травяно-кустарничкового яруса в сравнении с запасами травяно-кустарничкового яруса в лесах осочково-разнотравно-папоротниковых формаций.

2. В чистых темнохвойных лесах и в смешанных древостоях с примесью пихты сибирской, ели сибирской, сосны кедровой сибирской и других пород абсолютно сухая фитомасса трав была в пределах от 20 до 453 г/м², папоротников – от 1 до 72 г/м², хвощей – от 6 до 80 г/м², а кустарничков – 35 г/м². В целом надземная фитомасса травяно-кустарничкового яруса фитоценозов изменялась от 53 до 454 г/м².

3. С возникновением интенсивного отпада деревьев верхнего яруса после воздействия инвайдера формировалась благоприятная среда для злаковой и крупнотравной растительности. В видовом составе среди злаковых преобладали вейник лесной, пырей ползучий, а среди крупнотравья – борец северный, бодяк девясилородный, иван-чай узколистый.

4. На сплошных санитарных рубках, где первично в составе доминировала пихта, наблюдалось максимальное накопление травяно-кустарничкового яруса – 454 г/м².

5. Максимальное развитие травяно-кустарничкового яруса создает пожарную опасность в нарушенных насаждениях и снижает интенсивность лесовозобновления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Астапенко С.А., Ягунов М.Н., Голубев Д.В., Саишко Е.В. Оценка воздействия и распространения насекомых-вредителей в лесах Красноярского края на примере полиграфа уссурийского // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск: СПСА, 2014. С. 46–51.

Astapenko S.A., Yagunov M.N., Golubev D.V., Sashko E.V. Assessing the Impact and Spread of Pests in the Forests of the Krasnoyarsk Krai (A Case Study of the Four-Eyed Fir Bark Beetle). *Monitoring, Modeling and Forecasting of Hazardous Natural Phenomena and Emergencies: Proceedings of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference*. Zheleznogorsk, SFRA Publ., 2014, pp. 46–51. (In Russ.).

2. Бакшеева Е.О., Головина А.Н., Морозов С.А. Лесовозобновление и пожароопасность пихтовых насаждений, поврежденных полиграфом уссурийским // Хвойные бореал. зоны. 2021. Т. 39, № 6. С. 443–450.

Baksheeva E.O., Golovina A.N., Morozov S.A. Reforestation and Fire Hazard of Fir Stands Damaged by the *Polygraphus proximus*. *Conifers of the boreal area*, 2021, vol. 39, no. 6, pp. 443–450. (In Russ.).

3. Баранчиков Ю.Н., Петько В.М., Астапенко С.А., Акулов Е.Н., Кривец С.А. Уссурийский полиграф – новый агрессивный вредитель пихты в Сибири // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2011. № 4. С. 78–81.

Baranchikov Y.N., Petko V.M., Astapenko S.A., Akulov E.N., Krivets S.A. *Polygraphus proximus* – A New Aggressive Invasive Pest of Firs in Siberia. *Lesnoy vestnik – Forestry Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 78–81. (In Russ.).

4. Верхунов П.М., Черных В.Л. Таксация леса. 2-е изд., стереотипн. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. 396 с.

Verkhunov P.M., Chernykh V.L. *Forest Inventory*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2009. 396 p. (In Russ.).

5. Волокитина А.В. Разработка определителя типов основных проводников горения // Сиб. лесн. журн. 2023. № 6. С. 50–62.

Volokitina A.V. Development of an Identifier of Primary Fire Carriers. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2023, no. 6, pp. 50–62. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15372/SJFS20230606>

6. Голуб В.Б., Николайчук Л.Ф. Л.Г. Раменский и аллометрия растений (история и современное состояние проблемы) // Разнообразие растит. мира. 2021. № 1(8). С. 30–50.

Golub V.B., Nikolaychuk L.F. L.G. Ramensky and Allometry of Plants (History and Current State of the Problem). *Diversity of plant world*, 2021, no. 1(8), pp. 30–50. (In Russ.).

<https://doi.org/10.22281/2686-9713-2021-1-30-50>

7. Грозовская И.С. Биопродукционные характеристики живого напочвенного покрова старовозрастных пихто-ельников Северо-Востока Костромской области // Изв. СамНЦ РАН. 2012. Т. 14, № 1-6. С. 1445–1448.

Grozovskaya I.S. Biomass Parameters of Ground Vegetation in old-Growth Spruce-Fir Forest in the North-East of the Kostroma Region. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1-6, pp. 1445–1448. (In Russ.).

8. Грозовская И.С., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э., Бобровский М.В., Романов М.С., Глухова Е.М. Биомасса напочвенного покрова в еловых лесах Костромской области // Лесоведение. 2015. № 1. С. 63–76.

Grozovskaya I.S., Khanin L.G., Smirnov V.E., Bobrovskii M.V., Romanov M.S., Glukhova E.M. The Ground Cover Biomass of a Spruce Forest in Kostroma Oblast. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2015, no. 1, pp. 63–76. (In Russ.).

9. Дебков Н.М. Особенности возобновительных процессов пихтовых лесов в связи с трансформацией их микро мозаичной организации под воздействием уссурийского полиграфа // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 1(33). С. 5–16.

Debkov N.M. Peculiarities of Forest Regeneration Processes in Fir Forest Caused by Transformation of their Micro Mosaic Organization by *Polygraphus proximus* Blandf. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2017, no. 1(33), pp. 5–16. (In Russ.).

10. Дюкарев А.Г., Копысов С.Г., Кривец С.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А. Опыт и первые результаты комплексных биогеоценологических исследований в темнохвойных лесах юга таежной зоны Западной Сибири // Сиб. лесн. журн. 2024. № 3. С. 11–24.

Dyukarev A.G., Kopysov S.G., Krivets S.A., Pats E.N., Chernova N.A. An Experience and First Results of Complex Biogeocenological Studies in Dark Coniferous Forests in the South of the Taiga Zone of Western Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2024, no. 3, pp. 11–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20240303>

11. Иванова Н.С. Моделирование продуктивности травяно-кустарничкового яруса в коротко-производных березняках западных низкогорий Южного Урала // Аграрн. вестн. Урала. 2009. № 4(58). С. 96–98.

Ivanova N.S. Modeling the Productivity of the Herb and Subshrub Layers in Short-Derivative Birch Forests of the Western Lowlands of the Southern Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2009, no. 4(58), pp. 96–98. (In Russ.).

12. Керчев И.А. Экология полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera: Scolytidae, Scolytinae) в Западно-Сибирском регионе инвазии // Рос. журн. биол. инвазий. 2014. Т. 7, № 2. С. 80–95.

Kerchev I.A. Ecology of Four Eyed Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) in the West Siberian Region. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 80–95. (In Russ.).

13. Кривец С.А. Заметки по экологии уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) в Западной Сибири // Изв. СПбЛТА. 2012. № 200. С. 94–105.

Krivets S.A. Notes on the Ecology of the Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) in West Siberia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2012, no. 200, pp. 94–105. (In Russ.).

14. Кривец С.А., Керчев И.А. Уссурийский полиграф – новый опасный вредитель хвойных лесов Томской области // Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: сб. матер. VII Междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь–2011». Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 3, ч. 2. С. 211–215.

Krivets S.A., Kerchev I.A. *Polygraphus proximus* – A New Dangerous Pest of Coniferous Forests of Tomsk Oblast. *Economic Development of Siberia and the Russian Far East. Economics of Nature Management, Land Management, Forest Management, Real Estate Management: Proceedings of the 7th International Scientific Congress “GEO-Siberia–2011”*. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2011, vol. 3, part 2, pp. 211–215. (In Russ.).

15. Определитель растений юга Красноярского края / сост. М.И. Беглянова, Е.М. Васильева, Л.И. Кашина, В.Г. Кольцова, И.Ю. Коропачинский, И.М. Краснобородов, Т.К. Некошнова, В.А. Смирнова, В.Л. Черепнин, Е.М. Юдина; отв. ред. И.М. Краснобородов, Л.И. Кашина. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 670 с.

Identifier of Plants of the Southern Krasnoyarsk Krai. Compiled by M.I. Beglyanova, E.M. Vasilyeva, L.I. Kashina, V.G. Koltsova, I.Yu. Koropachinskiy, I.M. Krasnoborodov, et al. Ed. by I.M. Krasnoborov, L.I. Kashina. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1979. 670 p. (In Russ.).

16. Перевозникова В.Д., Баранчиков Ю.Н. Структура запасов наземной фитомассы в свежих шелкопрядниках пихтовой тайги Нижнего Приангарья // Энтомологические исследования в Сибири. 2002. № 2. С. 166–180.

Perevznikova V.D., Baranchikov Yu.N. Structure of Ground Phytomass Reserves in of the Fir Taiga of the Lower Angara Region Following an Outbreak of the Siberian Moth. *Entomological studies in Siberia*, 2002, no. 2, pp. 166–180. (In Russ.).

17. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. Режим доступа: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 03.04.26).

Plantarium. Plants and Lichens of Russia and Neighboring Countries: Open Online Galleries and Plant Identification Guide. (In Russ.).

18. Салцевич Ю.В., Буряк Л.В., Головина А.Н., Кукавская Е.А. Оценка состояния нарушенных пожарами, рубками и насекомыми-вредителями насаждений предгорий Восточного Саяна // Сиб. лесн. журн. 2023. № 6. С. 63–75.

Saltsevich Yu.V., Buryak L.V., Golovina A.N., Kukavskaya E.A. Assessment of the State of Forests Disturbed by Fires, Logging, and Insects in the Foothills of the Eastern Sayan Mountains. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2023, no. 6, pp. 63–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20230607>

19. Фуряев И.В., Жила С.В. Изменение пожарной опасности нарушенных темнохвойных насаждений Средней и Южной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2024. № 4(2). С. 35–41.

Furyaev I.V., Zhila S.V. Changes in the Fire Hazard of Disturbed Dark Coniferous Plantations in Central and Southern Siberia. *Interexpo Geo-Siberia*, 2024, no. 4(2), pp. 35–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-4-2-35-41>

20. Чернова Н.А. Трансформация растительного покрова пихтовых лесов Томской области под влиянием уссурийского полиграфа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 3, № 2. С. 271–277.

Chernova N.A. Transformation of Vegetation in Tomsk Region Siberian Fir Forests Under the Influence of *Polygraphus proximus* Blandf. *Interexpo Geo-Siberia*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 271–277. (In Russ.).

21. Шабалина О.М., Безкоровайная И.Н., Баранчиков Ю.Н. Изменение нижних ярусов фитоценозов пихтовых лесов в очагах массового размножения уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandf.) на территории Красноярского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 67–84.

Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N., Baranchikov Yu.N. Changes of Phytocenosis Understories of Fir Forests in the Breeding Grounds of Four-Eyed Fir Bark Beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.) in the Krasnoyarsk Territory. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 2, pp. 67–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.67>

22. Charron L., Hermanutz L. Prioritizing Boreal Forest Restoration Sites Based on Disturbance Regime. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 361, pp. 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.003>

23. Debkov N.M., Aleinikov A.A., Gradel A., Bocharov A.Y., 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>

24. Krivets S.A., Bisirova E.M., Kerchev I.A., Pats E.N., Chernova N.A. Transformation of Taiga Ecosystems in the Western Siberian Invasion Focus of Four-Eyed Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae). *Russian Journal of Biological Invasions*, 2015, vol. 6, pp. 94–108. <https://doi.org/10.1134/S2075111715020058>

25. Tatarintsev A.I., Aminev P.I., Mikhaylov P.V., Bulanova O.S. State of Dark Coniferous Plantations in the Southern Part of the Yenisei Siberia: The Role of Biotic Factors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 677, iss. 5, art. 677. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052075>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare 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



ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья

УДК 624.21

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-110-121

Совершенствование конструкции деревобетонных мостов с применением клееной древесины

В.А. Уткин, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-8400-2022](https://orcid.org/0000-0002-2044-3242),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>

П.Н. Кобзев , канд. техн. наук; ResearcherID: [ODK-5259-2025](https://orcid.org/0000-0003-0947-6227),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0947-6227>

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, просп. Мира, д. 5,
г. Омск, Россия, 644080; utkin_va@inbox.ru, kpn_omsk@mail.ru 

Поступила в редакцию 02.10.25 / Одобрена после рецензирования 20.12.25 / Принята к печати 22.12.25

Аннотация. Развитие лесного комплекса связано с применением транспортных средств большой массы, оказывающих значительные воздействия на дорожное полотно, сопоставимые с воздействиями от временной автодорожной нагрузки АК и НК класса 14, что требует строительства на лесных дорогах соответствующих искусственных сооружений. Ранее применяемые в дорожном строительстве деревянные мосты не соответствуют современным нагрузкам, нормам долговечности и безопасности. Наиболее целесообразными для лесных дорог являются конструкции на основе совместной работы клееных балок и монолитной железобетонной плиты проезжей части. Для композитных мостов, в т. ч. деревожелезобетонных, установлен срок службы 50 лет, что свидетельствует о высоких защитных свойствах железобетонной плиты и сохранности клееных балок на протяжении периода эксплуатации. Однако в нашей стране они не получили распространения в дорожном строительстве из-за ориентации на сборный железобетон. Вместе с тем зарубежный опыт указывает на эффективность применения в дорожном строительстве клееной древесины. Разработка и внедрение деревобетонных пролетных строений мостов ведутся как в России, так и в других странах. Настоящее исследование посвящено проектированию композитных пролетных строений мостов на основе совместной работы железобетонной плиты проезжей части и клееных балок с учетом воздействия автодорожных нагрузок А14 и Н14. Выполнен расчет нагрузок на элементы рассматриваемой конструкции. Результаты показывают соответствие несущей способности конструкции требованиям, предъявляемым к лесовозным мостам. Предложенная мостовая конструкция может быть применена как в гражданском мостостроении, так и на лесных дорогах с заменой ими дорогих и трудных для установки железобетонных пролетных строений.

Ключевые слова: деревобетонные мосты, композитные пролетные строения мостов, клееная древесина, деревобетонные пролетные строения мостов, деревобетон, деревобетонный мост, срок службы моста, автодорожные нагрузки, лесовозные мосты



Для цитирования: Уткин В.А., Кобзев П.Н. Совершенствование конструкции деревобетонных мостов с применением клееной древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 110–121. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-110-121>

Original article

Design Improvement of Composite Timber-Concrete Bridges Using Glued Laminated Timber

Vladimir A. Utkin, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-8400-2022](https://orcid.org/0000-0002-2044-3242), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>

Pavel N. Kobzev✉, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ODK-5259-2025](https://orcid.org/0000-0003-0947-6227), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0947-6227>

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), prosp. Mira, 5, Omsk, Russia, 644080; utkin_va@inbox.ru, kpn_oms@mail.ru✉

Received on October 2, 2025 / Approved after reviewing on December 20, 2025 / Accepted on December 22, 2025

Abstract. The development of the forestry sector involves the use of heavy vehicles, which exert a significant impact on the road surface comparable to the impact of temporary traffic loads AK and HK of class 14. This requires the construction of appropriate engineering structures to support forest roads. The wooden bridges previously used in road construction do not meet modern requirements for load-bearing capacity, durability, and safety. The most appropriate designs for forest roads are those that combine glued laminated beams with a cast-in-place concrete deck. Composite bridges, including timber-reinforced concrete bridges, have a 50-year service life, which proves the high protective properties of the reinforced concrete slab and the durability of the glued laminated beams throughout their life cycle. However, in our country, they are not widely used in road construction due to the preference for prefabricated reinforced concrete. Meanwhile, international experience demonstrates the effectiveness of using glued laminated timber in road construction. The development and implementation of timber-concrete bridge superstructures are ongoing in Russia as well as in other countries. This research focuses on the design of composite bridge superstructures based on the interaction between a cast-in-place concrete deck and glued laminated beams, considering the impact of A14 and H14 road loads. The load calculations for the elements of the considered structure have been performed. The results show that the structure's load-bearing capacity meets the requirements for logging bridges. The proposed bridge design can be used in both civil bridge construction and for forest roads, as a replacement for expensive and difficult-to-install reinforced concrete bridge superstructures.

Keywords: composite timber-concrete bridges, composite bridge superstructures, glued laminated timber, timber-concrete bridge superstructures, timber-concrete, timber-concrete bridge, bridge service life, road traffic loads, logging road bridges

For citation: Utkin V.A., Kobzev P.N. Design Improvement of Composite Timber-Concrete Bridges Using Glued Laminated Timber. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 110–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-110-121>

Введение

Внедрение в транспортное строительство прогрессивных конструкций и технологий, отвечающих современным требованиям и нагрузкам на основе более широкого применения в автодорожных мостах конструкций из клееной древесины, отличающихся долговечностью, эксплуатационной надежностью, доступностью, позволит существенно расширить область деревянного мостостроения и транспортного строительства России за счет эффективного использования возможностей лесного комплекса [13].

Лидирующее положение по применению клееной древесины в мостовых конструкциях занимают США, Канада, Финляндия, Норвегия, Швеция, Австралия и др. [11, 12, 15–21]. Эти страны богаты лесными ресурсами, поэтому возрастающий интерес с их стороны к этому материалу понятен. Пролетные балочные строения из клееной древесины в сочетании с железобетонной плитой проезжей части нашли широкое распространение, а клееная древесина получила признание и стала конкурентоспособным материалом.

Обозначенный в приложении 6 СП 35.13330.2011 минимальный срок службы для композитных мостов 50 лет совпадает со сроком службы для ребристых железобетонных пролетных строений с обычной арматурой, что подтверждает высокие защитные свойства железобетонной плиты и сохранность клееных балок на протяжении установленного срока службы.

Интерес к применению деревожелезобетонных пролетных строений в мостостроении проявлялся в разных странах и в разное время. Особенно широкое распространение они получили в США в 40-х, 50-х гг. прошлого столетия. Большинство из построенных сооружений эксплуатировалось более 50 лет и находилось в относительно хорошем состоянии [20]. В нашей стране период внимания к деревожелезобетонным пролетным строениям приходится на время образования предприятий по изготовлению клееных балок в конце 70-х гг. Однако техническая политика страны в целом в эти годы была направлена на массовое внедрение в строительство и мостостроение сборного железобетона, в результате развитие деревожелезобетонных пролетных строений мостов остановилось.

Разработкой деревожелезобетонных мостов в нашей стране занимались ученые СибАДИ: проф. К.Х. Толмачев [10], А.В. Шумахер, Ю.О. Мельников, П.А. Катцын, ученые ХабПИ под руководством В.И. Кулиша [3, 4], И.Ю. Белуцкого [1]. В последние годы были опубликованы также работы проф. П.А. Дмитриева [2], проф. В.П. Стукова [7–9], которые пока не нашли повсеместного практического применения.

Главное преимущество объединенной конструкции заключается в том, что она отвечает требованиям как по прочности, так и по долговечности. При этом включенная в совместную работу с клееными несущими балками железобетонная плита выполняет функции защиты от атмосферных воздействий и биологических разрушений для деревянных балок, а вся конструкция способна воспринимать расчетные нагрузки.

Применение клееных балок заводского изготовления в совместной работе с монолитной железобетонной плитой позволяет существенно снизить экономические затраты и трудозатраты, связанные с изготовлением, транспортом и монтажом металлических и железобетонных мостовых конструкций. Их замена более легкими и доступными конструкциями на основе совместной

работы материалов из дерева и монолитной железобетонной плиты особенно важна для освоения новых регионов страны. Однако предприятия, выпускающие в России клееную древесину, как правило, загружены только гражданским строительством. Транспортное строительство эти возможности не использует.

Что касается соединений железобетонной плиты с клееными балками, то предпочтение чаще отдавалось нагельным соединениям [3, 8]. Интерес к этим соединительным элементам сохраняется и сегодня.

Авторами были предложены более надежные соединения железобетонной плиты с брусчатыми поясами дощато-гвоздевого пролетного строения [5] с составными прогонами из брусьев [6] посредством горизонтальных стержней-упоров, размещенных в отверстиях выступов парных стальных накладок, входящих в тело плиты и закрепленных к поясным брусьям болтами [14]. В Роспатенте по патентам зарегистрирована также заявка на патент от 14.02.25 г. «Деревобетонное пролетное строение из клееных балок, включенных в совместную работу с железобетонной плитой проезжей части» № 2025103233 авторов В.А. Уткина, П.Н. Кобзева, В.В. Скибы – с аналогичным [5, 6] соединением железобетонной плиты и клееных балок.

Современный этап развития лесного комплекса требует использования транспортных средств большой массы, оказывающих значительные воздействия на дорожное полотно. Очевидно, что деревянные мосты под влиянием изменившихся нагрузок в конструкционном плане также должны быть модифицированы.

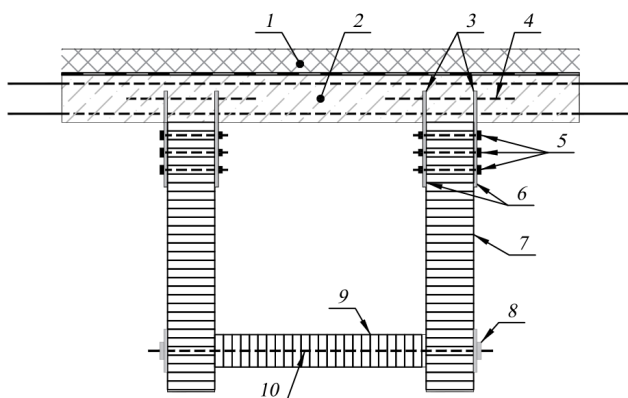
Цель – разработка конструктивных форм пролетных строений дорожных мостов с применением железобетонных и деревянных клееных элементов с учетом требований СП 35.13330.2011 к капитальным мостам на автомобильных дорогах.

Объекты и методы исследования

Рекомендуемая конструкция пролетного строения с клееными балками и железобетонной плитой. Пролетное строение (рис. 1) состоит из установленных на опоры с учетом поперечного уклона попарно объединенных монолитной железобетонной плитой 2 клееных балок 7 с устройством гидроизоляции и ездового полотна 1. Верхние пояса клееных балок снабжены закрепленными на них болтами 5 и распределенными по длине пролета стальными парными накладками 6 с выступами 3 и гибкими упорами 4.

Рис. 1. Конструкция блока деревожелезобетонного пролетного строения из спаренных клееных балок, $L = 15$ м (L – длина балки пролетного строения)

Fig. 1. Construction of a block of reinforced concrete superstructure made of paired glued beams $L = 15$ m (L – length of the superstructure beam)



При этом устройство горизонтальных диафрагм 9 в опорных зонах с обжатием высокопрочными стержнями 10 с креплениями 8 устранил перенапряжение опорных зон и сечений, повысив их сохранность.

Проектирование рекомендуемого пролетного строения под нагрузку А14 и Н14. В соответствии с указаниями СП 288.1325800.2016 проектирование водопропускных искусственных сооружений на лесных автомобильных дорогах допускается по СП 35.13330. 2011 «Мосты и трубы», согласно которым нормативную временную вертикальную нагрузку от автотранспортных средств следует принимать в виде полос АК, для которых класс нагрузки К предполагается равным 14 у всех мостов и труб, кроме деревянных – для них показатель равен 11. В качестве расчетной временной нагрузки принята нормативная автомобильная нагрузка А14 и колесная Н14. Пролетное строение на автомобильной дороге III–IV технической категории без тротуаров пролетом 15 м имеет габарит Г-8 и 2 полосы безопасности по 1 м, образовано 4 деревожелезобетонными блоками заводского изготовления с объединением в целое по плите проезжей части посредством омоноличивания продольного шва между блоками.

Результаты исследования и их обсуждение

Поперечное сечение пролетного строения и расчетные временные нагрузки приведены на рис. 2.

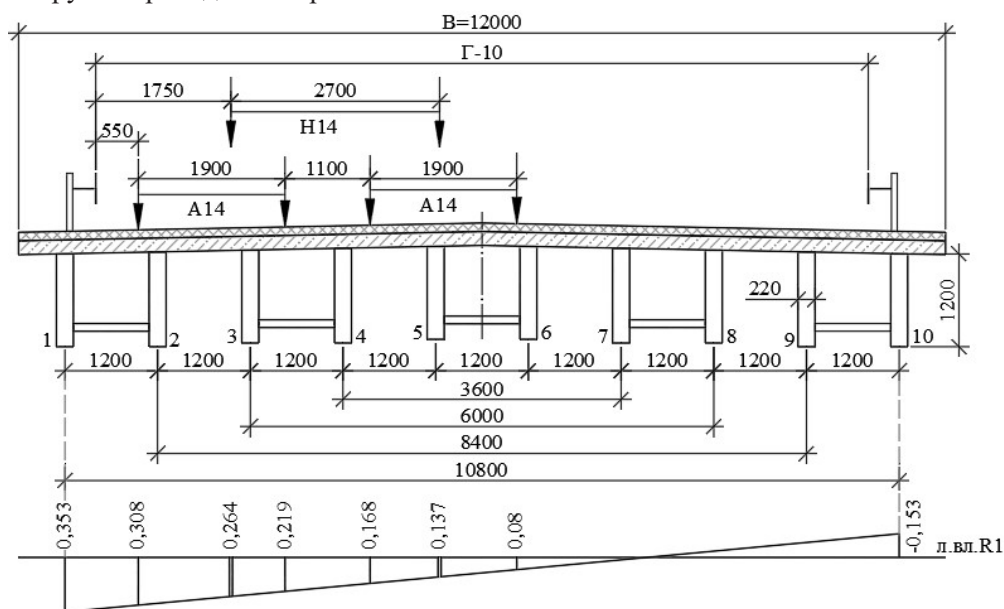


Рис. 2. Загружение пролетного строения и линии влияния R1 по методу внецентренного сжатия для балки I

Fig. 2. Loading of the superstructure and influence line R1 using the off-center compression method for beam I

Принятая конструкция дорожной одежды включает:

– асфальтобетонное покрытие на всю ширину пролетного строения

$$0,09 \cdot 12,0 \cdot 2,3 \cdot 1,5 \cdot 10,0 = 37,26 \text{ кН/пог. м.};$$

– гидроизоляционное покрытие

$$0,005 \cdot 1,9 \cdot 12,0 \cdot 1,3 \cdot 10,0 = 1,48 \text{ кН/пог. м.};$$

– железобетонную плиту толщиной 21 см

$0,21 \cdot 2,5 \cdot 12,0 \cdot 1,1 \cdot 10,0 = 69,3$ кН/пог. м.;

– ограждение, нагрузка от него равна 4,4 кН/пог. м.

Итого: 112,44 кН/пог. м.

Итого на балку: 11,24 кН/пог. м.

Временную нагрузку распределяем между балками с помощью коэффициентов поперечной установки (КПУ), для определения которых используем приближенный метод внецентренного сжатия для крайней балки I .

Две полосы нагрузки АК максимально приближены к ограждению безопасности. Для балки I получим:

$$\text{КПУ}_A = 0,5(0,308 + 0,219 + 0,168 + 0,08) = 0,3875.$$

Ось нагрузки НК должна быть расположена не ближе 1,75 м от кромки проезжей части. Для балки I получим:

$$\text{КПУ}_{\text{НК}} = 0,5(0,264 + 0,137) = 0,2005.$$

Загружение линий влияния изгибающего момента в середине и в четверти пролета временными нагрузками А14 и Н14 представлено на рис. 3.

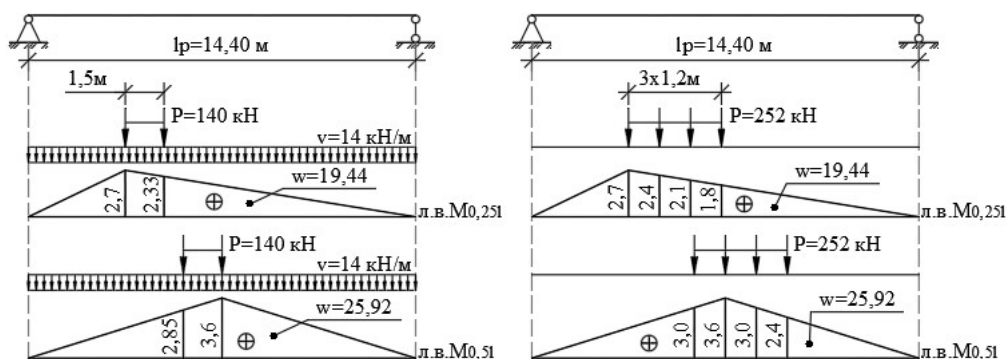


Рис. 3. Схемы загрузки линий влияния (л. в.) изгибающих моментов отдельной балки временными нагрузками А14 и Н14 (l – длина пролета; l_p – расчетная длина пролета; P – осевая нагрузка; w – площадь; v – полосовая нагрузка)

Fig. 3. Loadcases of the influence lines (л. в.) for bending moments of a separate beam under temporary loads A14 and N14 (l – span length; l_p – design span length; P – axial load; w – area; v – strips load)

Коэффициенты надежности по нагрузке: для тележки АК $\gamma_f = 1,5$; для равномерно распределенной части $\gamma_f = 1,25$; для нагрузки НК $\gamma_f = 1,1$.

Динамический коэффициент $(1 + \mu)$: для тележки АК $(1 + \mu) = 1,3$; для равномерно распределенной АК $(1 + \mu) = 1,0$; для НК $\gamma_f = 1,0$.

Изгибающий момент в балке от постоянной и временной нагрузки определяем по следующим выражениям:

$$M_{\text{АК}} = g\omega_M + (1 + \mu)_{\text{АК}} \left[\gamma_{f,v} \cdot \text{КПУ}_{v,\text{АК}} \omega_M + \gamma_{f,p} P_{\text{АК}} \cdot \text{КПУ}_{p,\text{АК}} (y_1 + y_2) \right];$$

$$M_{\text{НК}} = g\omega_M + (1 + \mu)_{\text{НК}} \gamma_{f,\text{НК}} P_{\text{НК}} \cdot \text{КПУ}_{\text{НК}} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4),$$

где g – постоянная нагрузка, кН/ пог. м.; ω – площадь линии влияния усилия, м².

В результате получим:

– от постоянной g и временной А14

$$M_{\text{АК}}^{0,251} = 11,24 \cdot 19,44 \cdot 1,1 + 140 (2,7 + 2,325) 1,5 \cdot 1,3 \cdot 0,411 \cdot 1,0 + 14 \cdot 19,44 \cdot 0,353 \cdot 1,25 = 240,25 + 561,0 + 120,0 = 921,35 \text{ кНм};$$

$$M_{AK}^{0,5l} = 11,24 \cdot 25,92 \cdot 1,1 + 140 (3,6 + 2,85) \cdot 1,5 \cdot 0,411 \cdot 1,3 \cdot 1,0 + \\ + 14 \cdot 25,92 \cdot 0,353 \cdot 1,25 = 320,47 + 723,7 + 160,0 = 1204,2 \text{ кНм};$$

– от постоянной и колесной Н14

$$M_{HK}^{0,25l} = 11,24 \cdot 19,44 \cdot 1,1 + 252 (2,7 + 2,4 + 2,1 + 1,8) 0,206 \cdot 1,1 = \\ = 240,25 + 513,0 = 753,25 \text{ кНм};$$

$$M_{HK}^{0,5l} = 11,24 \cdot 25,92 \cdot 1,1 + 252 (3,6 + 3,0 + 3,0 + 2,4) 0,206 \cdot 1,1 = \\ = 320,47 + 685,24 = 1005,7 \text{ кНм}.$$

Загружение линий влияния поперечной силы опорного сечения в четверти и середине пролета временными нагрузками А14 и Н14 показано на рис. 4.

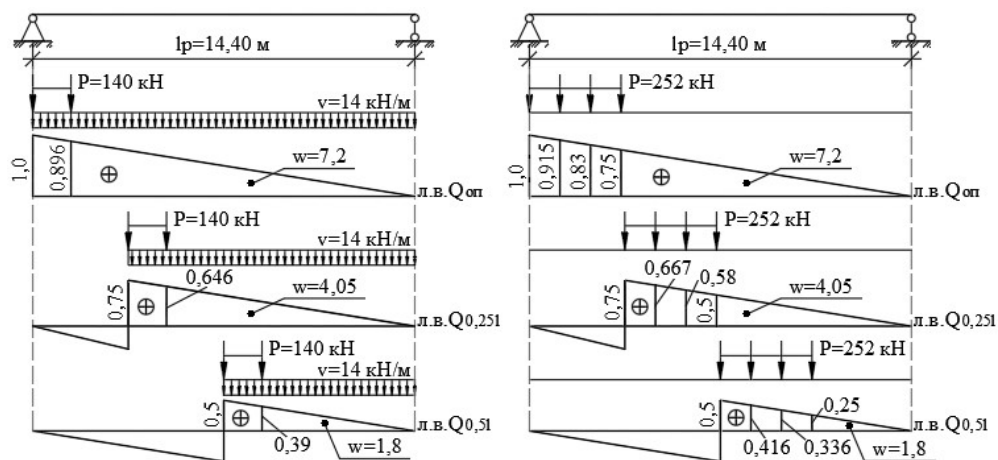


Рис. 4. Схемы загрузки линий влияния поперечных сил отдельной балки временными нагрузками А14 и Н14

Fig. 4. Loadcases of the influence lines of transverse forces of a separate beam under temporary loads A14 and H14

Поперечную силу определяем по выражениям:

$$Q_{AK} = g\omega_Q + (1 + \mu)_{AK} \left[\gamma_{f,v} \cdot \text{КПУ}_{v,AK} \omega_Q + \gamma_{f,p} P_{AK} \cdot \text{КПУ}_{p,AK} (y_1 + y_2) \right];$$

$$Q_{HK} = g\omega_Q + (1 + \mu)_{HK} \gamma_{f,HK} P_{HK} \cdot \text{КПУ}_{HK} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4).$$

В результате получим:

$$Q_{AK}^L = 11,24 \cdot 7,2 \cdot 1,1 + 140 (1 + 0,896) 1,5 \cdot 0,411 \cdot 1,3 + 14 \cdot 7,2 \cdot 0,353 \cdot 1,25 \cdot 1 = \\ = 89,02 + 212,74 + 44,35 = 346,11 \text{ кН};$$

$$Q_{HK}^L = 11,24 \cdot 7,2 \cdot 1,1 + 252 (1 + 0,917 + 0,833 + 0,75) 0,206 \cdot 1,1 = 89,02 + 199,86 = \\ = 288,9 \text{ кН};$$

$$Q_{AK}^{0,25l} = 11,24 \cdot 4,05 \cdot 1,1 + 140 (0,75 + 0,646) 1,5 \cdot 0,411 \cdot 1,3 + 14 \cdot 4,05 \cdot 1,25 \cdot 0,353 = \\ = 50,07 + 157,08 + 24,95 = 232,06 \text{ кН};$$

$$Q_{HK}^{0,25l} = 11,24 \cdot 4,05 \cdot 1,1 + 252 (0,75 + 0,667 + 0,582 + 0,499) 0,206 \cdot 1,1 = \\ = 50,07 + 142,68 = 192,75 \text{ кН}.$$

Эпюры расчетных усилий приведены на рис. 5, а геометрические характеристики поперечного сечения балки – на рис. 6. Согласно рис. 6, статический момент приведенного сечения $I_{np} = 13,89 \cdot 10^6 \text{ см}^4$.

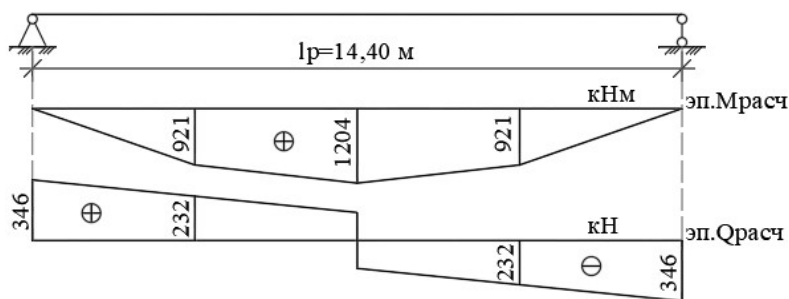
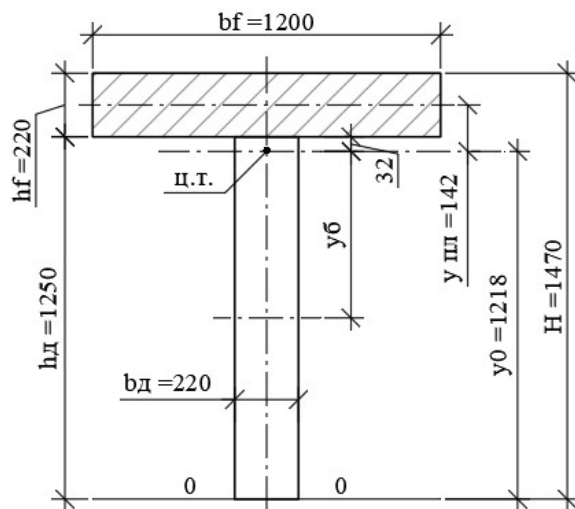


Рис. 5. Эпюры (эп.) расчетных усилий деревобетонной балки при нагрузках А14 и Н14

Fig. 5. Diagrams of the design forces of a wooden concrete beam under loads A14 and H14

Рис. 6. Поперечное сечение деревобетонной балки (H – высота балки; b – ширина; h – толщина или высота; f – пояс или полка; $д$ – дерево; $б$ – балка; пл. – плита; ц.т. – центр тяжести)Fig. 6. Cross section of a wooden concrete beam (H – beam height; b – width; h – thickness or height; f – belt or shelf; $д$ – wood; $б$ – beam; пл. – plate; ц.т. – center of gravity)

Таким образом, имеем:

– растягивающие напряжения в нижних волокнах балки

$$\sigma_H = \frac{12,04 \cdot 10^6}{13,89 \cdot 10^6} 121,8 = 105,6 \text{ кг/см}^2 \approx [R_{\text{пред}} = 104];$$

– напряжения сжатия по оси железобетонной плиты:

$$\sigma_B = \frac{12,04 \cdot 10^6}{13,89 \cdot 10^6} 14,2 = 12,3 \text{ кг/см}^2 < [R_{\text{пред}} = 17,5].$$

Проектирование соединений. Соединительные элементы выполнены в виде 2 стальных пластин-фасонок, толщиной не менее 8 мм, закрепленных попарно к верхнему поясу клееных балок болтами с входящими в железобетонную плиту выступами для размещения в их отверстиях стержневых упоров, работающих на отрыв и сдвиг.

Размещение соединительных элементов на верхнем поясе балки выполнено равномерно по длине пролета с разбивкой на 8 участков, длиной по 180 см.

Ступенчатая эпюра расчетных поперечных сил по длине полупролета приведена на рис. 7.

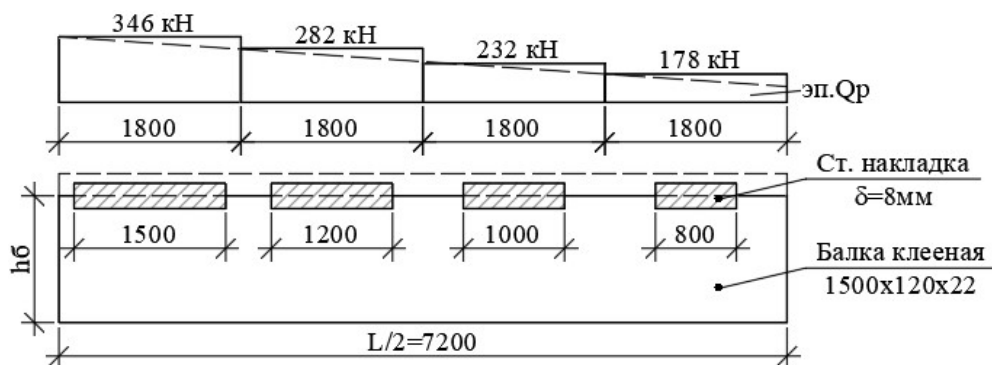


Рис. 7. Распределение накладок по участкам на длине полупролета балки, $L = 15$ м (δ – толщина листа; Ст. накладка – стальная накладка)

Fig. 7. Distribution of plates by sections along the half-span length of the beam $L = 15$ m (δ – sheet thickness; Ст. накладка – steel fish plate)

Расчет стержневых упоров и болтов закрепления стальных накладок к балкам выполнен в соответствии со значениями сдвигающих сил T_i на участке a_i :

$$T = \frac{QS_{\text{пл}}}{I} a_i,$$

где $S_{\text{пл}}$ – статический момент плиты, м^3 ; I – момент инерции балки, м^4 .

В результате $T_1 = 168$ кН; $T_2 = 137$ кН; $T_3 = 113$ кН; $T_4 = 86,5$ кН.

Согласно СП 35.13330,2011 п. 10.17, расчетная несущая способность стального нагеля диаметром 16 мм в клееной балке толщиной 22 см:

– по смятию в средних элементах симметричного сечения

$$R_{\text{см}} = 0,441dt_1 = 0,441 \cdot 1,6 \cdot 22 = 15,53 \text{ кН};$$

– по изгибу нагеля диаметром 16 мм

$$R_{\text{и}} = 2,256d^2 = 2,256 \cdot 2,56 = 5,77 \text{ кН на срез.}$$

В итоге расчетная несущая способность двухсрезного нагеля принята $T_{\text{наг}} = 11,6$ кН.

Согласно формуле $n_i = \frac{T_i}{T_{\text{наг}}}$ количество двухсрезных нагелей по участкам I–IV балки составит: $n_1 = 168 / 11,6 = 14,5$; $n_2 = 137 / 11,6 = 11,8$; $n_3 = 113 / 11,6 = 9,9$; $n_4 = 86,5 / 11,6 = 7,4$.

В итоге соответственно по участкам принято 16, 12, 10 и 8 шт. (рис. 8).

Таким образом, деревожелезобетонные пролетные строения с балками из клееной древесины заводского изготовления возможно применять на современных автомобильных дорогах при нагрузках А14 и Н14 для пролетов не менее 15 м.

В настоящее время специализированными предприятиями по изготовлению деревянной клееной конструкции освоено изготовление широкого спектра клееных балок длиной до 18 м, высотой до 2 м и толщиной до 0,25 м и многослойных перекрестных плит с размерами, соответствующими предлагаемому конструкциям балок для мостов.



Рис. 8. Узел объединения железобетонной плиты и балок
(Ж.б. плита – железобетонная плита; d – диаметр)

Fig. 8. The junction point of the reinforced concrete slab and beams
(Ж.б. плита – reinforced concrete slab; d – diameter)

Заключение

В нормативных документах по лесным дорогам главное место отведено постоянным деревянным мостам. Ранее применяемые в дорожном строительстве деревянные мосты не соответствуют современным нагрузкам, требованиям по долговечности и безопасности движения, сняты с производства и заменены капитальными (железобетонными, стальными, сталежелезобетонными), в исключительных случаях используются как временные.

Рассмотренные и приведенные в данной статье конструкции пролетных строений из древесины могут быть с успехом внедрены на лесовозных дорогах. Для этого необходимо формирование специализированных предприятий по изготовлению пролетных строений из клееной древесины на основе цельно перевозимых конструкций заводского изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белуцкий И.Ю. Об эффективности клееных армированных деревянных балок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1973. № 2. С. 16–22.
Belutskiy I.Yu. On the Effectiveness of Glued Reinforced Wooden Beams. *News of higher educational institutions. Construction*, 1973, no. 2, pp. 16–22. (In Russ.).
2. Дмитриев П.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Специальный курс. Автодорожные и пешеходные мосты. Оренбург: Газпромнефть, 2002. 192 с.
Dmitriyev P.A. *Structures of Wood and Plastics. Special Course. Road and Pedestrian Bridges*. Orenburg, Gazpromneft Publ., 2002. 192 p. (In Russ.).
3. Кулиш В.И. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. М.: Транспорт, 1979. 160 с.
Kulish V.I. *Laminated Wooden Bridges with Reinforced Concrete Slab*. Moscow, Transport Publ., 1979. 160 p. (In Russ.).
4. Кулиш В.И., Белуцкий И.Ю., Быков Б.С., Цуканов В.П. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации деревянных мостов с железобетонной плитой // Автомобильн. дороги. 1982. № 10. С. 7–9.
Kulish V.I., Belutskiy I.Yu., Bykov B.S., Tsukanov V.P. Experience of Designing, Construction and Operation of Laminated Wooden Bridges with Reinforced Concrete Slab. *Avtomobil'nyye dorogi*, 1982, no. 10, pp. 7–9. (In Russ.).

5. Патент 2731968 С1 РФ, МПК E01D 2/04. Деревобетонное пролетное строение из дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с железобетонной плитой, включенной в совместную работу с блоками: № 2019117816: заявл. 07.06.2019; опубл. 09.09.2020 / В.А. Уткин, И.И. Готовцев.

Utkin V.A., Gotovtsev I.I. *Wood-Concrete Span from Plank-Cobble-Dowel-Nailing Blocks with Reinforced Concrete Plate, which is Included into Joint Operation with Blocks*. Patent RF, no. RU 2 731 968 C1, 2020. 11 p. (In Russ.).

6. Патент № RU 2766385 С1, МПК E 01D 2/00. Деревобетонное пролетное строение с составными прогонами из брусьев и железобетонной плитой: № 2021110129: заявл. 13.04.2021; опубл. 15.03. 2022 / В.А. Уткин.

Utkin V.A. *Wood-Concrete Span with Composite Girders from Bars and Reinforced Concrete Slab*. Patent RF, no. RU 2 766 385 C1, 2022. 8 p. (In Russ.).

7. Стуков В.П. Совершенствование конструктивно-технологической системы пролетного строения с деревожелезобетонными балками // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. № 3. С. 56–60.

Stukov V.P. Improvement of Constructive-Technological System of Bridge Framework with Wood-Reinforced Concrete Beams. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2004, no. 3, pp. 56–60. (In Russ.).

8. Стуков В.П. Анализ состояния мостов с балками из клееной древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2006. № 6. С. 52–57.

Stukov V.P. Bridges' State Analysis with Laminated Wood Beams. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2006, no. 6, pp. 52–57. (In Russ.).

9. Стуков В.П. Деревожелезобетонные балочные мосты на автомобильных дорогах: моногр. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск: Севмашвтуз, 2009. 453 с.

Stukov V.P. *Timber-Reinforced Concrete Girder Bridges on the Roads*: Monograph. Arkhangelsk, Sevmashvtuz Publ., 2009. 453 p. (In Russ.).

10. Теоретические и экспериментальные исследования мостов и строительных конструкций: сб. науч. тр. под ред. проф. К.Х. Толмачева. № 4-6. Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1971–1973.

Theoretical and Experimental Studies of Bridges and Building Structures: Collection of Academic Papers. Ed. by Prof. Tolmachev K.Kh. No. 4-6. Omsk, Zapadno-Sibirskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1971–1973. (In Russ.).

11. Уткин В.А. Обеспечение совместной работы перекрестной деревоплиты с ребрами в пролетных строениях из клееной древесины // Промышл. и гражданск. строительство. 2008. № 3. С. 40–41.

Utkin V.A. Maintenance of Joint Operation of Two-Way Timber Slab and Ribs in Span Structures Made of Glued Wood. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo* = Industrial and Civil Engineering, 2008, no. 3, pp. 40–41. (In Russ.).

12. Уткин В.А., Кобзев П.Н. Автодорожные деревянные мосты нового поколения. Омск: СибАДИ, 2004. 56 с.

Utkin V.A., Kobzev P.N. *Road Timber Bridges of a New Generation*. Omsk, SibADI Publ., 2004. 56 p. (In Russ.).

13. Уткин В.А., Кобзев П.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния ребристого пролетного строения из клееной древесины // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 10. С. 94–100.

Utkin V.A., Kobzev P.N. Investigation of Stressed-Strain State of a Ribbed Span out of Glued Wood. *News of higher educational institutions. Construction*, 2005, no. 10, pp. 94–100. (In Russ.).

14. Уткин В.А., Кобзев П.Н., Басич Е.Е., Скиба В.В. О развитии и совершенствовании деревобетонных мостов // Вестн. СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 296–318.

Utkin V.A., Kobzev P.N., Basich E.E., Skiba V.V. On Design and Development of Wood-Concrete Bridge Structure. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2025, vol. 22, no. 2, pp. 296–318. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318>

15. *Handbook 1 – Timber Structures*. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/06/B/F/P P/1 68007, 2008. 243 p.

16. Hosseini M., Gaff M., Lair J., Hui D., Li H., Hosseini A., et al. Design and Analysis of Timber-Concrete-Based Civil Structures and Its Applications: A Brief Review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2023, vol. 62, iss. 1, art. 20220321.

<https://doi.org/10.1515/rams-2022-0321>

17. Rodrigues J.N., Dias A.M.P.G., Providência P. Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art-Review. *BioResources*, 2013, vol. 8(4), pp. 6630–6649.

<https://doi.org/10.15376/biores.8.4.6630-6649>

18. Rodrigues J.N., Dias A.M.P.G., Providência P. Timber-Concrete Composite Bridges – Sustainability Assessment. *COST– Timber Bridges Conference 2014*. Biel/Bienne, Switzerland, University of Coimbra, 2014. 7 p.

19. Van der Linden M. Timber-Concrete Composite Beams. *HERON*, 1999, vol. 44, no. 3, pp. 215–239.

20. Wacker J.P., Dias A.M.P.G., Hosteng T.K. 100-Year Performance of Timber–Concrete Composite Bridges in the United States. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, vol. 25, iss. 3, art. 04020006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001513)

21. Yeoh D., Fragiocomo M., De Franceschi M., Heng Boon K. State of the Art on Timber–Concrete Composite Structures: Literature Review. *Journal of Structuring Engineering*, 2011, vol. 37, iss. 10, pp. 1085–1095.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X0000353)

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Научная статья

УДК 691.113, 620.178.151.6, 620.179

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-122-132

Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) методами ударного импульса и упругого отскока

А.С. Королев[✉], канд. техн. наук, ст. науч. сотр.;

ResearcherID: JKI-0714-2023, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

Е.С. Шарапов, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: B-8151-2014,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

А.О. Быков, науч. сотр.; ResearcherID: KFR-1574-2024,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

П.Г. Тимаков, инженер; ResearcherID: MGB-0595-2025,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1590-5029>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; korolevas@volgatech.net[✉], sharapoves@volgatech.net, anton_bykov02@mail.ru, pavel.timakov.99@mail.ru

Поступила в редакцию 03.07.25 / Одобрена после рецензирования 27.09.25 / Принята к печати 29.09.25

Аннотация. Неразрушающий контроль широко применяется для определения технического качества, строения и внутреннего состояния древесных материалов и древесины в растущих деревьях и элементах деревянных конструкций. В число перспективных направлений для оценки физико-механических свойств конструкционных материалов входят методы упругого отскока и ударного импульса. Цель работы – апробирование использования данных методов для косвенного определения плотности, статической твердости и динамического модуля упругости древесины. Исследования проведены на 67 бездефектных образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с нормализованной влажностью и размерами 50×50×50 мм³ с использованием мобильных приборов «Оникс 2.6» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) и Silver Schmidt (Proceq SA, Шверценбах, Швейцария). Оценена изменчивость измеряемых параметров, получены регрессионные модели взаимосвязи параметров упругого отскока и ударного импульса с физико-механическими свойствами древесины. Наибольшие коэффициенты вариации соответствуют параметрам ударного импульса по радиальной и тангенциальной поверхностям образцов и статической твердости радиальной поверхности образцов. Установлена умеренная взаимосвязь плотности ($R^2 = 0,49$) и динамического модуля упругости вдоль волокон ($R^2 = 0,39$) с упругим отскоком от радиальной поверхности образцов. Невысокие коэффициенты детерминации моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины сосны являются следствием недостаточного диапазона варьирования плотности образцов, а также локальности оценки свойств данными методами, что ограничивает их применение для оперативной оценки свойств древесины у растущих деревьев, пиломатериалов и в элементах деревянных конструкций. Методы могут быть использованы для ориентировочной оценки древесины или определения участков, пораженных гнилями. Повышение качества моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины методами ударного импульса и упругого отскока может быть достигнуто за счет использования инденторов с большей площадью контакта, а также расши-

рения диапазона изменчивости свойств образцов для одной или нескольких пород древесины, что и будет являться целью дальнейших изысканий.

Ключевые слова: склерометр, неразрушающий контроль, упругий отскок, ударный импульс, плотность древесины, сосна, *Pinus sylvestris* L., статическая твердость, динамический модуль упругости

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта РНФ № 23-16-00220, <https://rscf.ru/project/23-16-00220/>.

Для цитирования: Королев А.С., Шарапов Е.С., Быков А.О., Тимаков П.Г. Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) методами ударного импульса и упругого отскока // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 122–132. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-122-132>

Original article

Evaluation of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Mechanical and Physical Properties Using the Impact Pulse and Elastic Rebound Methods

Aleksandr S. Korolev✉, Candidate of Engineering, Senior Research Scientist;
ResearcherID: JKI-0714-2023, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

Evgenii S. Sharapov, Doctor of Engineering, Prof.;
ResearcherID: B-8151-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

Anton O. Bykov, Research Scientist; ResearcherID: KFR-1574-2024,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3429-5902>

Pavel G. Timakov, Engineer; ResearcherID: MGB-0595-2025,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1590-5029>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Russia, 424000;
korolevas@volgatech.net✉, sharapoves@volgatech.net, anton_bykov02@mail.ru,
pavel.timakov.99@mail.ru

Received on July 3, 2025 / Approved after reviewing on September 27, 2025 / Accepted on September 29, 2025

Abstract. Nondestructive testing is widely used for determining the technical quality, structure and internal condition of wood-based materials and wood in growing trees and elements of wood structures. The elastic rebound and impact pulse method belong to the most promising methods for evaluation of the physical and mechanical properties of construction materials. The paper aims at testing the application of these methods for indirect determination of wood density, static hardness and dynamic modulus of elasticity. The study used 67 non-defective specimens of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood with a normalized moisture content and dimensions of 50×50×50 mm³ with the use of applied portative devices such as Oniks 2.6 (Interpribor, Chelyabinsk, Russia) and Silver Schmidt (Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland). We assessed variability of the measured parameters and obtained regression models of the relationship between the parameters of elastic rebound/impact pulse and the mechanical and physical properties of wood. The highest variation coefficients were obtained for the impact pulse on the radial and tangential surfaces of the specimens as well as for the static hardness of the radial surface of the specimens. A moderate correlation was found

between the density ($R^2 = 0.49$) / dynamic modulus of elasticity along the fibers ($R^2 = 0.39$) and the elastic rebound from the radial surface of the specimens. The low determination coefficients of the models for predicting the mechanical and physical properties of pine wood are due to the limited range of variation in the specimen density, as well as the local nature of the property evaluation with these methods. All this limits their application for the operational assessment of the properties of standing trees, lumber, and wooden construction elements. These methods are useful for estimating the wood quality or identifying areas affected by rot. The improved quality of models for predicting the mechanical and physical properties of wood by means of the impact pulse and elastic rebound methods may be achieved by using indenters with a larger contact area, as well as by expanding the range of variability in specimen properties for one or more wood species. This will be the focus of our further research.

Keywords: sclerometer, non-destructive testing, elastic rebound, impact pulse, wood density, pine, *Pinus sylvestris* L., static hardness, dynamic modulus of elasticity

Funding: The research was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-16-00220, <https://rscf.ru/en/project/23-16-00220/>.

For citation: Korolev A.S., Sharapov E.S., Bykov A.O., Timakov P.G. Evaluation of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Mechanical and Physical Properties Using the Impact Pulse and Elastic Rebound Methods. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 122–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-122-132>

Введение

Методы неразрушающего контроля широко применяются исследователями и специалистами для определения технического качества, строения и внутреннего состояния древесных материалов и древесины в растущих деревьях и элементах деревянных конструкций [14, 19, 22, 24]. Для решения наиболее распространенных задач, таких как оценка упругих свойств конструкционных материалов, плотности древесины в растущих деревьях, а также обследование живых деревьев и деревянных строительных конструкций, используются акустические [6, 9, 10, 16, 28] и механические методы неразрушающего контроля [1, 7, 12, 15, 18, 21]. Каждый из методов имеет свои преимущества и ограничения, например, параметры прохождения в акустических методах слабо коррелируют с плотностью древесины [23, 27], приборы для измерения сопротивления сверлению [1, 7, 21] характеризуются высокой стоимостью. Методы, основанные на анализе глубины проникновения в материал металлических штифтов или игл [12, 13, 15, 26], малоинформативны и неточны. Актуальность решаемых задач подталкивает ученых как к совершенствованию существующих, так и к разработке новых методов и средств неразрушающего контроля.

Опубликованы одни из первых результатов использования для прогнозирования свойств древесины известных методов неразрушающей оценки прочностных свойств материалов – ударного импульса и упругого отскока, основанных на измерении силовых и скоростных параметров при соударении инденторов с поверхностью материалов. Преимуществами данных методов являются простота использования, малые габариты и стоимость приборов. Исследователями из Бразилии установлена корреляционная взаимосвязь ($R = 0,31–0,93$) между упругим отскоком и статической твердостью древесины для 4 лиственных пород [19]. При этом наибольшая сопряженность данных параметров была получена при измерениях на торцевой поверхности образ-

цов древесины. Результаты изучения взаимосвязи плотности древесины тропических пород с широким диапазоном варьирования (от 400 до 1200 кг·м⁻³) с упругим отскоком ($R^2 > 0,7$) представлены в работе [24]. Эффективность применения метода также обоснована в работе [25], результатом которой являются модели прогнозирования прочностных свойств древесины эвкалипта (R^2 до 0,92). Использование метода упругого отскока апробировано и на растущих деревьях [17]. Перспективы применения метода для оценки технического качества древесины в элементах деревянных конструкций изучены в работе [11], направленной на исследование влияния напряженно-деформированного состояния деревянных балок на результаты измерений.

При неразрушающей оценке упругих свойств древесины у растущих деревьев, в конструкционных пиломатериалах или элементах деревянных конструкций акустическими методами плотность древесины может быть определена косвенно или на образцах незначительного размера, что усложняет процесс измерений. В связи с этим поиск альтернативных методов прогнозирования плотности древесины также является актуальным.

Целью данной работы стало апробирование методов упругого отскока и ударного импульса для косвенного определения плотности, статической твердости и динамического модуля древесины сосны как одной из основных пород, используемых для изготовления конструкционных пиломатериалов.

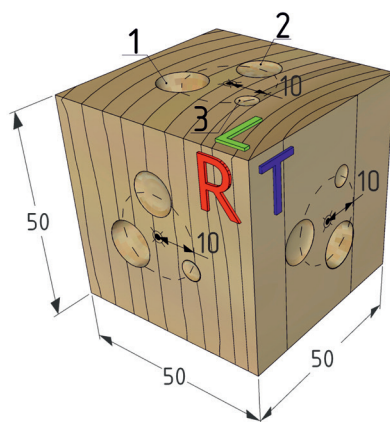
Объекты и методы исследования

Лабораторные измерения проведены на 67 прямослойных, бездефектных образцах древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) размерами 50×50×50 мм³ (рис. 1), изготовленных из заболонной и ядровой частей сердцевинной доски и кондиционированных в климатической комнате при 20 °C/65 % RH до достижения постоянной массы (ГОСТ 16483.0–89). Торцовая, радиальная и тангенциальная поверхности образцов были обработаны шлифовальной шкуркой на тканевой основе с зернистостью 12-Н (P100) на ленточном плоскошлифовальном станке. Плотность древесины определяли стереометрическим методом: измеряли массу образцов на лабораторных весах Vibra ALE-623 (Shinko Denshi Co., Ltd., Токио, Япония) и их геометрические размеры с помощью электронного штангенциркуля. Плотность рассчитывали как отношение массы к объему.

Рис. 1. Образец и схематическое изображение участков измерений (отпечатков) на торцовой (L), радиальной (R) и тангенциальной (T) поверхностях:

- 1 – участок контакта полусферического пуансона оснастки испытательной машины (радиус – 5,64 мм); 2 – участок контакта индентора прибора Silver Schmidt, тип L; 3 – участок контакта индентора прибора «Оникс 2.6»

Fig. 1. Specimen and schematic illustration of the measurement areas (dents) on the end (L), radial (R), and tangential (T) surfaces: 1 – contact area of the hemispherical punch of the testing machine (radius – 5.64 mm); 2 – contact area of the Silver Schmidt indenter, L type; 3 – contact area of the Onyx 2.6 indenter



В последующем определяли скорость прохождения ультразвуковых колебаний через изготовленные образцы древесины вдоль и поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях с расчетом динамического модуля упругости. Скорость ультразвуковых колебаний рассчитывали по времени их прохождения через образец с использованием прибора «Пульсар 2.2» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) с номинальной частотой ультразвуковых преобразователей 60 кГц. Измерения проводили посредством сухого акустического контакта по переднему фронту сигнала с расположением приемника и передатчика друг напротив друга (рис. 2, а).

Динамический модуль упругости (МПа) древесины для каждого направления анизотропии определяли без учета коэффициентов поперечной деформации [10, 20] по выражению:

$$E_{\text{дин}} = \rho_{12} V^2,$$

где ρ_{12} – плотность при нормализованной влажности, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; V – скорость ультразвуковых колебаний, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Статическую твердость древесины определяли на тангенциальной, радиальной и торцевой поверхностях образцов по ГОСТ 16483.17–81 на универсальной испытательной машине УТС-111.2-100-62 (ООО «Тестсистемы», Иваново, Россия).

Для фиксации ударного импульса использовали прибор «Оникс 2.6» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия). Принцип работы прибора основан на измерении и анализе электрического напряжения, возникающего на выходе пьезоэлектрической пластины при соударении индентора прибора с поверхностью образца [8]. Ударный импульс ($\text{мВ} \cdot \text{мс}$) при этом определяется по выражению [2]:

$$S = \int_0^{\tau} U dt \text{ или } S = U_{\text{ср}} \tau,$$

где U – выходное напряжение пьезоэлектрического датчика, мВ; dt – переменная интегрирования; $U_{\text{ср}}$ – среднее выходное напряжение пьезоэлектрического датчика, мВ; τ – продолжительность соударения, мкс.

Упругий отскок определялся прибором Silver Schmidt, тип L, анализирующим скорости индентора (плунжера) до и после его соударения с поверхностью образца. Выражение для определения упругого отскока (%) [4]:

$$Q = \frac{V_{\text{после}}}{V_{\text{до}}} 100\%,$$

где $V_{\text{после}}$ и $V_{\text{до}}$ – скорость индентора прибора после и до соударения с поверхностью образца соответственно, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Измерение ударного импульса и упругого отскока осуществляли в вертикальном направлении, перпендикулярно торцевой, радиальной и тангенциальной поверхностям образцов, установленным на опорной плите универсальной испытательной машины (рис. 2, б, в).

Максимальную глубину отпечатков (остаточных деформаций) после соударения инденторов приборов с торцевой, радиальной и тангенциальной поверхностями образцов древесины определяли с помощью электронного индикатора на магнитной стойке с точностью 0,01 мм.

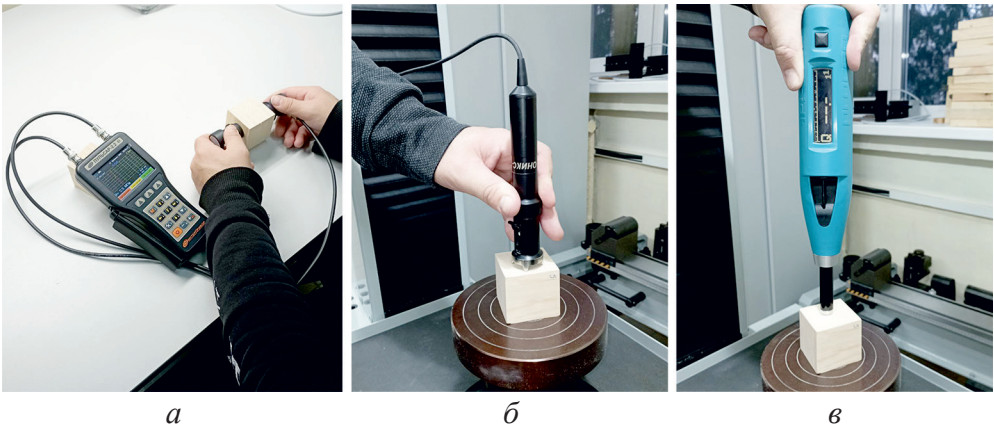


Рис. 2. Определение скорости прохождения ультразвуковых колебаний через образец (а) и ударного импульса (б) и упругого отскока (в)

Fig. 2. Measurement of the speed of ultrasonic vibrations passing through a specimen (a) and the impact pulse (b) and elastic rebound (c) values

Статистическую обработку результатов измерений и расчетов проводили 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).

Результаты исследования и их обсуждение

При взаимодействии инденторов приборов с поверхностями образцов древесина деформировалась, при этом размеры оставленных отпечатков (остаточной деформации древесины) значимо зависели (тест Тьюки) от типа прибора и видов разрезов. Средняя максимальная глубина отпечатков при использовании прибора «Оникс 2.6» составила 0,31 (CV = 34,6 %), 0,43 (CV = 38,8 %) и 0,31 (CV = 24,2 %) мм для торцевой, тангенциальной и радиальной поверхностей образцов соответственно. Меньшие глубины отпечатков установлены прибором Silver Schmidt – 0,26 (CV = 46,5 %), 0,38 (CV = 27,6 %) и 0,25 (CV = 24,6 %) мм.

Также показано, что основные оцениваемые параметры имели свои пределы изменения и особенности распределения в оцениваемой выборке (табл. 1). Наиболее значительно варьировал ударный импульс от радиальной и тангенциальной поверхностей, а также статическая твердость радиальной поверхности образцов. Плотность древесины, динамический модуль упругости поперек волокон в радиальном направлении и упругий отскок от торцевой поверхности древесины изменялись значительно слабее.

Таблица 1

Вариабельность оцениваемых параметров в исследованной выборке образцов
Variability of the evaluated parameters in the studied sample set

Параметр	M±m	X _{min}	X _{max}	S _x	CV	A _{ст}	E _{ст}
ρ ₁₂	396,1±2,6	354,9	430,8	21,5	5,4	0,18	–2,04
H _L	29,27±0,27	25,3	36,0	2,2	7,5	2,07	0,8
H _T	13,12±0,15	10,9	15,5	1,2	9,2	0,73	–1,12

Окончание табл. 1

Параметр	$M \pm m$	$X_{\min}$	$X_{\max}$	S_x	CV	$A_{\text{ст}}$	$E_{\text{ст}}$
H_R	13,14±0,19	10,1	16,6	1,6	12,2	0,93	-0,49
$E_{\text{дин}}^L$	10367±117	7995	12256	960,9	9,2	-1,65	-0,39
$E_{\text{дин}}^T$	999,0±11,3	834,0	1284,0	92,1	9,2	2,47	1,13
$E_{\text{дин}}^R$	1665,0±9,7	1513,0	1897,0	79,8	4,8	1,35	0,77
S_L	14,10±0,17	11,2	17,9	1,4	10,1	1,18	0,33
S_T	6,09±0,11	3,2	7,8	0,9	14,4	-3,10	2,97
S_R	6,22±0,11	4,2	8,4	0,9	14,2	0,80	-0,27
Q_L	37,66±0,27	34,5	48,0	2,2	5,9	6,69	10,77
Q_T	31,43±0,41	23,0	40,0	3,4	10,7	0,22	0,36
Q_R	39,24±0,43	32,0	44,5	3,5	8,9	-1,45	-1,22

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение и его ошибка; $X_{\min}$, $X_{\max}$ – минимальное и максимальное значения; S_x – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации, %; $A_{\text{ст}}$ – стандартизованная величина асимметрии; $E_{\text{ст}}$ – стандартизованная величина эксцесса; H – статическая твердость, Н·мм⁻².

Для оценки возможности прогнозирования физико-механических свойств древесины сосны методами ударного импульса и упругого отскока в табл. 2 представлены коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи плотности, статической твердости тангенциальной, радиальной и торцевой поверхностей образцов древесины с ударным импульсом и упругим отскоком.

Таблица 2

Коэффициенты детерминации линейных моделей взаимосвязи плотности, статической твердости и динамического модуля упругости с ударным импульсом и упругим отскоком от торцевой, радиальной и тангенциальной поверхностей
Determination coefficients for the linear models of the relationship between density/static hardness/dynamic modulus of elasticity and the values of impact pulse and elastic rebound from the end, radial, and tangential surfaces

	S_L	S_T	S_R	Q_L	Q_T	Q_R
H_L	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,07
H_T	0,03	0,05	0,03	0,01	0,01	0,03
H_R	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,12
ρ_{12}	0,01	0,03	0,10	0,02	0,04	0,49
$E_{\text{дин}}^L$	0,01	0,01	0,16	0,13	0,10	0,39
$E_{\text{дин}}^T$	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,27
$E_{\text{дин}}^R$	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02

Согласно полученным результатам, сопряженность ударного импульса от торцевой, радиальной и тангенциальной поверхностей образцов с плотностью и статической твердостью древесины отсутствует. При этом установлена умеренная взаимосвязь плотности ($R^2 = 0,49$) и динамического модуля упругости вдоль волокон ($R^2 = 0,39$) с упругим отскоком от радиальной поверхности образцов древесины.

Полученный результат обусловлен несколькими причинами. Во-первых, конструктивными особенностями используемых приборов. Так, индентор при-

бора Silver Schmidt имеет значительно больший радиус закругления, равный 25 мм. При этом радиус закругления индентора прибора «Оникс 2.6» составляет 6 мм. За счет этого площадь поверхности контакта индентора с древесиной у прибора Silver Schmidt значительно выше и номинально индентор взаимодействует с большим количеством годовичных слоев древесины, в т. ч. ранней и поздней древесины, снижая размах измеряемого параметра.

Во-вторых, влияет тип поверхности образца, что также связано с варьированием физико-механических свойств древесины сосны в пределах годовичного слоя – изменение в 2–3 раза [3, 5]. Например, при измерениях на тангенциальной поверхности соударение индентора с древесиной может быть только по ранней или поздней древесине, что значимо повлияет на результаты измерений, но не будет отражать свойств древесины всего образца.

Результаты регрессионного анализа взаимосвязи плотности и динамического модуля упругости вдоль волокон с упругим отскоком от радиальной поверхности образца древесины, имеющие максимальные коэффициенты детерминации, представлены на рис. 3.

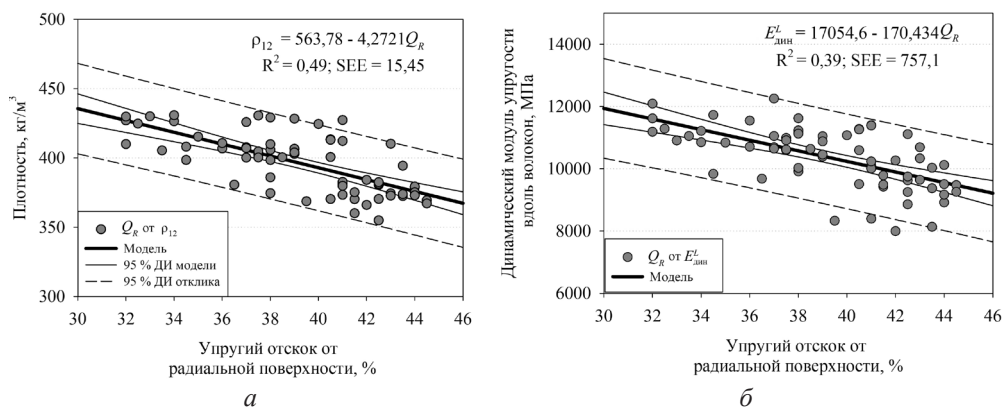


Рис. 3. Регрессионные модели взаимосвязи плотности (а) и динамического модуля упругости вдоль волокон (б) с упругим отскоком от радиальной поверхности образца:

ДИ – доверительный интервал для модели и отклика соответственно;

R^2 – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации

Fig. 3. Regression models of the relationship between density (a) and dynamic modulus of elasticity along the fibers (b) with elastic rebound from the radial surface of the specimen: ДИ – a confidence interval for the model and the response, respectively, R^2 – coefficient of determination, SEE – standard error of approximation

Результаты обратной регрессии прогнозирования плотности древесины (рис. 3, а) не согласуются с опубликованными ранее моделями прямой регрессии с более высокими коэффициентами детерминации для 3 направлений анизотропии древесины $R^2 = 0,69\text{--}0,76$ [24]. Это связано в первую очередь с диапазоном варьирования плотности древесины сосны, который в нашем случае составил $355\text{--}431\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, что значительно уступало диапазону плотностей древесины образцов различных пород, используемых в работе [24] – $400\text{--}1200\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Недостаточные коэффициенты детерминации моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины сосны ограничивают применение методов упругого отскока и ударного импульса для оперативной оценки свойств древесины у растущих деревьев, пиломатериалов и в элементах деревянных конструкций. Данные методы могут быть использованы лишь для ориентиро-

вочной оценки свойств древесины или определения участков древесины, пораженных гнилями, в т. ч. с опорой на информацию о диапазонах упругого отскока или ударного импульса, полученных для бездефектных образцов сосны в ходе данной работы.

Заключение

Развитие приборной базы, а также простота использования методов ударного импульса и упругого отскока обуславливают их перспективность для неразрушающей оценки свойств древесины и древесных материалов. Вместе с тем данные методы основаны на локальных измерениях свойств в зоне контакта индентора с древесиной и не рекомендуются для косвенной неразрушающей оценки статической твердости древесины сосны. Полученные регрессионные модели для упругого отскока от радиальной поверхности образцов могут быть применены только для ориентировочной оценки плотности ($R^2 = 0,49$) и динамического модуля упругости ($R^2 = 0,39$) древесины сосны ввиду недостаточной степени взаимосвязи данных параметров. Повышение качества моделей прогнозирования физико-механических свойств древесины методами ударного импульса и упругого отскока может быть достигнуто за счет использования инденторов с большей площадью контакта и расширения диапазона изменчивости плотности образцов одной или нескольких пород древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Королев А.С., Шаранов Е.С., Попов В.А. Оценка внутреннего состояния древесины в балках перекрытий методом измерения сопротивления сверлению // Вестн. гражданск. инж. 2023. № 5(100). С. 21–30.

Korolev A.S., Sharapov E.S., Popov V.A. Assessment of Internal Condition of Wood in Inter-Floor Covering Beams by Drilling Resistance Measurement Method. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* = Bulletin of Civil Engineers, 2023, no. 5(100), pp. 21–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-21-30>

2. Курс теоретической механики / ред.: В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин, К.С. Колесников, В.А. Космодемьянский, Б.П. Назаренко, А.А. Панкратов, П.Г. Русанов, Ю.С. Саратов, Ю.М. Степанчук, Г.М. Тушева, П.М. Шкапов. 4-е изд., испр. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 758 с.

Course of Theoretical Mechanics: Textbook for Universities. Ed. by V.I. Drong, V.V. Dubinin, M.M. Il'in, et al. Moscow, BMSTU Publ., 2011. 758 p. (In Russ.).

3. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.
Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p. (In Russ.).

4. Стихановский Б.Н., Скобликова М.В. Определение твердости и дефектов поверхности методом упругого отскока // Совр. науч. исслед. и инновации. 2011. № 7. Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2011/11/5286> (дата обращения: 05.06.25).

Stihanovskiy B.N., Skoblikova M.V. Hardness and Surface Defects by Rebound. *Modern scientific researches and innovations*, 2011, no. 7. 12 p. (In Russ.).

5. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. 5-е изд., перераб. и доп. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Ugolev B.N. *Wood Science and Forest Commodity Science*. Moscow, MGUL Publ., 2007. 351 p. (In Russ.).

6. Федяев А.А., Чубинский А.Н. Неразрушающие методы контроля свойств продукции из древесины. СПб.: Галаника, 2022. 118 с.

Fedyaev A.A., Chubinsky A.N. *Nondestructive Testing Methods for Wood Product Properties*. Saint Petersburg, GALANIKA Publ., 2022. 118 p. (In Russ.).

7. Шаранов Е.С. Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2020. 340 с.

Sharapov E.S. *Improvement of Methods and Means of Quasi-non-Destructive Testing of Physical and Mechanical Properties of Wood and Wood-Based Materials*: Dr. Engin. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2020. 340 p. (In Russ.).

8. Ямпольский Д.З. О возможности определения энергии ударного импульса методом индикаторных диаграмм // Вестн. науч.-техн. развития. 2024. № 2(173). С. 9–15.

Yampolsky D.Z. About the Possibility of Determining Energy of the Shock Pulse by the Method of Indicator Diagrams. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* = Bulletin of Science and Technical Development, 2024, no. 2(173), pp. 9–15. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18411/vntr2024-173-2>

9. 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. 126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>

10. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Ed. by T.E. Timell, R. Wimmer. Berlin, Springer, 2006. 393 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

11. Da Veiga N.S., Soriano J. Sclerometric Index Evaluated Along the Depth of Cross-Section of Timber Beams. *Scientia Forestalis*, vol. 47, no. 122, pp. 359–373. (In Portuguese). <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n122.19>

12. Jaskowska-Lemańska J., Wałach D., Górka-Stańczyk M. Correction Factors for Sclerometric Test Results in the Technical Assessment of Timber Structural Elements Under Diverse Conditions. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 24, art. 7582.

<https://doi.org/10.3390/ma16247582>

13. Karlinasari L., Fredisa Y., Adzkie U., Fauziyyah S., Dwiyantri F., Siregar I.Z. Use of a Pin-Penetration Wood Density Meter to Determine the Density of 25 Indonesian Species. *BioResources*, 2021, vol. 16, iss. 2, pp. 3032–3045.

<https://doi.org/10.15376/biores.16.2.3032-3045>

14. Kloiber M., Drdácý M., Machado J.S., Piazza M., Yamaguchi N. Prediction of Mechanical Properties by Means of Semi-Destructive Methods: A Review. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 101, part 2, pp. 1215–1234.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.134>

15. Kloiber M., Drdácý M., Tippner J., Hrivnák J. Conventional Compressive Strength Parallel to the Grain and Mechanical Resistance of Wood Against Pin Penetration and Microdrilling Established by *in-situ* Semidestructive Devices. *Materials and Structures*, 2015, vol. 48, pp. 3217–3229. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0392-6>

16. 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, iss. 3, art. 62.

<https://doi.org/10.1007/s13595-020-00957-x>

17. Lorensani R.G.M., Gonçalves R. Machine Learning Algorithms and Nondestructive Methods for Estimating Wood Density in Planted Forest Trees. *Forests*, 2025, vol. 16, no. 2, art. 376. <https://doi.org/10.3390/f16020376>

18. Mäkipää R., Linkosalo T. A Non-Destructive Field Method for Measuring Wood Density of Decaying Logs. *Silva Fennica*, 2011, vol. 45, no. 5, art. 91.

<https://doi.org/10.14214/sf.91>

19. Martins I.Z., Deldotti L.R., Soriano J., Faria D.L. Janka Hardness of Hardwood Species Evaluated by the Nondestructive Sclerometric Method. *Materials and Structures*, 2022, vol. 55, art. 227. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02064-x>

20. Mora C.R., Schimleck L.R., Isik F., Mahon J.M., Clark A., Daniels R.F. Relationship Between Acoustic Variables and Different Measures of Stiffness in Standing *Pinus taeda* Trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 39, no. 8, pp. 1421–1429. <https://doi.org/10.1139/X09-062>

21. Oliveira J.T.S., Wang X., Vidaurre G. Assessing Specific Gravity of Young *Eucalyptus* Plantation Trees Using a Resistance Drilling Technique. *Holzforschung*, 2017, vol. 71, no. 2, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0058>

22. Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., et al. Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us About Wood Property Variation. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 9, art. 728. <https://doi.org/10.3390/f10090728>

23. 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, iss. 2, art. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>

24. Soriano J., da Veiga N.S., Martins I.Z. Wood Density Estimation Using the Sclerometric Method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2015, vol. 73, pp. 753–758. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0948-3>

25. Soriano J., Gonçalves R., Bertoldo C., Trinca A.J. Application of Esclerometric Test Method in Pieces of *Eucalyptus saligna*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2011, vol. 15(3), pp. 322–328. (In Portuguese). <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300015>

26. Tannert T., Anthony R.W., Kasal B., Kloiber M., Piazza M., Riggio M., et al. *In situ* Assessment of Structural Timber Using Semi-Destructive Techniques. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 767–785. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>

27. 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>

28. Wang X., Ross R.J., McClellan M., Barbour J., Erickson J.R., Forsman J.W., et al. *Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique*. Research Paper FPL, RP–585. USDA Forest Service, 2000. 9 p.

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 Шарапов Е.С.; проведение измерений: Быков А.О. и Тимаков П.Г.; обработка результатов и графическое представление данных: Королев А.С. и Шарапов Е.С.; подготовка и редактирование рукописи Королев А.С., Шарапов Е.С. и Быков А.О.; научное руководство: Шарапов Е.С.

Authors' Contribution: Conceptualization and methodology by Korolev A.S. and Sharapov E.S.; laboratory tests by Bykov A.O. and Timakov P.G.; processing of results and graphical presentation by Korolev A.S. and Sharapov E.S.; review writing and editing by Korolev A.S., Sharapov E.S. and Bykov A.O.; supervision by Sharapov E.S.

Научная статья

УДК 674-416; 674.049.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-133-149

Биорефайнинг древесного сырья: получение биоадгезива на основе гемицеллюлоз

С.Д. Пименов^{1✉}, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.;

ResearcherID: [AAC-9435-2020](https://orcid.org/0000-0001-6042-0021), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>

А.И. Сизов¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAI-2030-2020](https://orcid.org/0000-0001-9412-5557),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>

И.В. Кручина-Богданов², канд. хим. наук; ResearcherID: [JTU-2141-2023](https://orcid.org/0000-0001-5779-5404),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-5404>

А.А. Добровольский¹, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABF-7706-2020](https://orcid.org/0000-0002-6816-4912),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6816-4912>

С.Р. Мамбетова¹, аспирант; ResearcherID: [OVZ-9120-2025](https://orcid.org/0000-0003-4617-7824),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-7824>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; chudopim@mail.ru[✉], alexander-83@yandex.ru, sofya.mam@icloud.com

²ООО «АМТ», Абонентский ящик, д. 70, Санкт-Петербург, Россия, 197022;

igogo011@gmail.com

Поступила в редакцию 20.11.25 / Одобрена после рецензирования 05.02.26 / Принята к печати 09.02.26

Аннотация. Разработана ресурсоэффективная технология биорефайнинга лигноцеллюлозного сырья, направленная на получение древесной дегидратационной смолы – биоадгезива. Процесс реализуется прямым способом из гемицеллюлоз посредством парофазного гидролиза и последующей сушки в кислородсодержащей среде и пригоден для масштабирования. Показано, что при сушке гидролизат-массы протекает кислотно-катализируемая дегидратация пентоз с образованием реакционноспособных углеводных интермедиатов и их последующей олигомеризации/карбонизации («гуминоподобные» конденсаты); средняя молекулярная масса водорастворимых продуктов возрастает с ~195 до ~296 Да. По данным FTIR, происходит дегидратация углеводной фазы (ослабление ОН-полос 3350–3400 см⁻¹ и С–О/С–О–С-полос 1150–1040 см⁻¹) и карбонильных групп (1705–1710 см⁻¹), а по данным ¹³С ЯМР – увеличение вкладов С=О и О-алкил-центров не сопровождается появлением отчетливых ароматических или фурановых сигнатур, что соответствует формированию конденсированной «гуминоподобной» сети. Смола отверждается при 180 °С за 22–27 с; при введении H₂SO₄ ≥ 6 % (от сухого вещества смолы) после желатинизации образуется водонерастворимая масса. На основе древесной дегидратационной смолы получены древесноволокнистые плиты высокой плотности с повышенной водостойкостью (разбухание 6–21 % за 24 ч), что сопоставимо с современными биоадгезивами и превосходит типичные составы по стойкости к воде. Эмиссия формальдегида по методу WKI составила 1,7 мг/100 г. Результаты соотносятся с текущими трендами биоадгезивов на основе лигнина, танинов и полисахаридов, демонстрируя возможность полного отказа от формальдегида при приемлемых физико-механических свойствах готового продукта.

Ключевые слова: биорефайнинг, древесные композиционные материалы, клеевые массы, дегидратация, олигомеризация, гидролиз гемицеллюлоз, биоэкономика, возобновляемое сырье

Для цитирования: Пименов С.Д., Сизов А.И., Кручина-Богданов И.В., Добровольский А.А., Мамбетова С.Р. Биорефайнинг древесного сырья: получение биоадгезива на основе гемицеллюлоз // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 133–149. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-133-149>

Original article

Biorefining of Wood Feedstock: Production of a Hemicellulose-Based Bioadhesive

Sergey D. Pimenov[✉], *Candidate of Engineering, Junior Research Scientist;*

ResearcherID: AAC-9435-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>

Alexander I. Sizov¹, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;* ResearcherID: AAI-2030-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>

Igor V. Kruchina-Bogdanov², *Candidate of Chemistry;* ResearcherID: JTV-2141-2023, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-5404>

Alexander A. Dobrovolsky¹, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: ABF-7706-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6816-4912>

Sofya R. Mambetova¹, *Postgraduate Student;* ResearcherID: OVZ-9120-2025, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-7824>

¹Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Liter U, Saint Petersburg, Russia, 194021; chudopim@mail.ru[✉], alexander-83@yandex.ru, sofya.mam@icloud.com

²ООО «АМТ», PO Box 70, Saint Petersburg, Russia, 197022; igogo011@gmail.com

Received on November 20, 2025 / Approved after reviewing on February 5, 2026 / Accepted on February 9, 2026

Abstract. A resource-efficient biorefining technology for lignocellulosic feedstock has been developed to obtain a wood dehydration resin (WDR) as a bio-adhesive. The process is implemented directly from hemicelluloses via steam-phase hydrolysis followed by drying in an oxygen-containing atmosphere and is suitable for industrial scale. It was demonstrated that when drying of the hydrolysate mass, acid-catalyzed dehydration of pentoses occurs with the formation of reactive carbohydrate intermediates and their subsequent oligomerization/carbonization (“humic-like” condensates); the average molecular weight of water-soluble products increases from ~195 to ~296 Da. FTIR data register signatures of dehydration of the carbohydrate phase (attenuation of OH bands at 3350–3400 cm⁻¹ and C–O/C–O–C bands at 1150–1040 cm⁻¹) and an increase in carbonyl groups (1705–1710 cm⁻¹), while ¹³C NMR shows increased contributions of C=O and O-alkyl centers without distinct aromatic or furan signatures, consistent with the formation of a condensed humic-like network. The resin gelling was observed at 180 °C within 22–27 s; upon addition of H₂SO₄ ≥ 6 % (based on resin solids) the gel becomes water-insoluble. High-density fiberboards (HDF) produced with the resin exhibited enhanced water resistance (thickness swelling 6–21 % after 24 h), which is comparable to modern bio-adhesives and outperforms typical starch-based formulations in water resistance. Formaldehyde emission by the WKI method was as low as 1.7 mg/100 g. These results align with current trends in lignin-, tannin-, and polysaccharide-based bio-

adhesives, demonstrating the possibility of eliminating formaldehyde while maintaining acceptable physico-mechanical properties.

Keywords: biorefining, wood-based composites, adhesive systems, dehydration, oligomerization, hemicellulose hydrolysis, bioeconomy, renewable feedstock

For citation: Pimenov S.D., Sizov A.I., Kruchina-Bogdanov I.V., Dobrovolsky A.A., Mambetova S.R. Biorefining of Wood Feedstock: Production of a Hemicellulose-Based Bioadhesive. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 133–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-133-149>

Введение

Переход к устойчивой биоэкономике, основанной на использовании возобновляемых биологических ресурсов, является одним из ключевых вызовов современности [2, 15, 20]. В контексте лесного и химического комплексов это подразумевает разработку новых материалов и технологий, замещающих продукты нефтехимии. Древесные композиционные материалы (ДКМ), такие как древесно-стружечные плиты (ДСтП), фанера или древесноволокнистые плиты (ДВП), широко используются в строительстве и мебельной промышленности. Традиционно они производятся с применением синтетических смол, в т. ч. формальдегидных, изоцианатных, поливинилацетатных [3]. При этом растущие опасения по поводу выбросов формальдегида и зависимость от ископаемых ресурсов стимулируют разработку клеевых композиций на основе возобновляемых ресурсов, таких как лигнин, крахмал, танины, белки или гемицеллюлозы [18, 19, 27, 35].

Исследования в области адгезивов на основе танинов и сахарозы показали, что кислотный катализ позволяет значительно снизить температуру отверждения таких композиций, что делает процесс более энергоэффективным [23, 29, 30]. Перспективным направлением является использование белковых изолятов (соевого, хлопкового) и их смесей с полисахаридами (ксиланом, крахмалом), что дает возможность варьировать свойства клея и снижать его стоимость [13, 19, 20, 34]. Активно изучаются также композиции на основе лигнина и танинов, извлекаемых из сельскохозяйственных отходов, для производства плит интерьерного назначения [16, 32, 33]. Рассматривается возможность частичной замены фенола и формальдегида биоальтернативами (лигнин- и фуран-содержащими системами), что снижает зависимость производства от нефтехимии [14, 16, 26].

Несмотря на активные исследования, слабые адгезионные свойства многих биополимеров приводят к тому, что большинство разработок способно лишь частично заменить синтетические смолы и не решает проблему фундаментально [15, 20]. Поэтому важнейшей задачей является создание высокоэффективных адгезивов, синтезированных из возобновляемого сырья.

Фенолформальдегидные смолы, являющиеся стандартом для плит повышенной влагостойкости, производятся из фенола – нефтехимического продукта. Рост цен на нефть и экологические требования стимулируют поиск альтернатив [3]. Древесина сама по себе – возобновляемый и экологичный материал, однако для производства ДКМ требуются большие количества синтетических клеев, часто содержащих вредные вещества. В связи с этим желательно сократить использование синтетического клея [2].

Исследования [18, 29, 30] показали, что природные клеи требуют дополнительной модификации или ввода катализаторов, плиты без добавления связующего имеют ограниченную сырьевую базу и неудовлетворительные свойства, а методы активации предполагают использование агрессивных реагентов [1, 7]. Таким образом, актуальны разработки безопасных и экологичных клеев природного происхождения.

В данном исследовании мы предлагаем новый подход к синтезу древесной дегидратационной смолы (ДДС) из гемицеллюлозного сырья. Разработанная смола позиционируется как ключевой продукт для биоэкономики лесного сектора, позволяющий создавать конкурентоспособные ДКМ без использования летучего и токсичного формальдегида (предельно допустимая эмиссия для класса E2 3,5–8,0 мг/м²-ч, для E1 – менее 3,5 мг/м²-ч и для E0,5 – менее 1,8 мг/м²-ч) с минимальной зависимостью от ископаемых ресурсов [2, 15, 20].

Целью настоящей работы является создание ресурсо- и энергоэффективной технологии получения олигомерной смолы из пентозосодержащих растительных материалов для производства ДКМ.

Разработан новый вид ДДС для использования в производстве древесных композиционных материалов. Опытные образцы ДКМ на основе ДДС показали возможность получения прочных водостойких ДСтП и ДВП без использования токсичного формальдегида. ДДС в значительной степени экологична, производится из гемицеллюлоз возобновляемого растительного сырья методом парового гидролиза и не содержит летучих токсичных компонентов [5, 7].

При производстве ДСтП и ДВП наиболее широкое распространение получили клеевые массы на основе карбамидоформальдегидных смол (КФС). Они дешевы, бесцветны, имеют высокую скорость отверждения, а изделия на их основе характеризуются прочностью. Вместе с тем древесные плиты и фанера, склеенные КФС, имеют невысокую водостойкость, а при современном развитии промышленности и массовом использовании фанеры и древесных плит в качестве напольных покрытий и отделочных строительных материалов существует серьезная опасность превышения фонового уровня формальдегида в жилых и офисных помещениях.

Радикальным способом решения проблемы формальдегидных клеевых масс для производства ДКМ является полный отказ от формальдегида с заменой на новые экологичные смолы. Работы в этом направлении во всем мире ведутся на протяжении последних десятилетий. Предложено большое количество видов смол для производства ДКМ, в т. ч. эпоксидные, полиуретановые, поливинилацетатные, основу которых составляют короткоцепные олигомеры [3]. Использование этих смол часто ограничено высокой себестоимостью и/или отсутствием требуемых эксплуатационных свойств готовых материалов [20].

Большая часть разработанных в последнее время клеевых масс изготавливается из нефтехимического сырья и имеет низкую экологическую составляющую. Исключением являются смолы на основе возобновляемого растительного сырья – фурфурола или его производных [8, 17]. Эти смолы при повышенных температурах в присутствии кислотных катализаторов конденсируются и образуют сшитые термореактивные полимеры; такие клеевые композиции обладают хорошими прочностью и водостойкостью. Тем не менее, фурфурольные смолы практически не используются ввиду высокой стоимости фурфурола [4, 8].

Фурфурол получают из гемицеллюлоз растительных материалов путем кислотного гидролиза и последующей дегидратации образующихся пентозных сахаров. Гидролиз гемицеллюлоз происходит в гетерогенных условиях на границе твердой и жидкой фаз при температурах выше 150 °С в присутствии сильных минеральных кислот; далее в растворе пентозы дегидратируются с отщеплением 3 молекул воды и образованием фурфурола [4, 9, 17].

Дегидратация пентоз в водных растворах минеральных кислот представляет собой систему сопряженных превращений, где ксилопиранозная форма дает фурфурол через 2,5-ангидридные интермедиаты; процесс хорошо описывается реакцией первого порядка и чувствителен к массопереносу и кислотности [17, 22]. Существующая технология промышленного получения фурфурола дает невысокий выход (около 4–8 %) и требует значительных энергетических затрат [4]. Причиной низкого выхода является склонность фурфурола к глубокой конденсации в кислых растворах с образованием гуминов – нерастворимых сетчатых полимеров [25, 31].

С целью увеличения выхода фурфурола дегидратацию пентоз в водных растворах предлагали проводить в двухфазных системах с экстрагентами (толуол, метилизобутилкетон), где образующийся фурфурол диффундирует из водной фазы в органическую, что снижает вторичную конденсацию. Высокие выходы (до 90 % от теоретического) получены при дегидратации в среде γ -валеролактона при 200–230 °С [11, 24].

Дегидратация растворов ксилоты на твердофазных катализаторах – цеолитах в H-форме – показала, что развитая пористость и кислотные центры последних обеспечивают проникновение сахаров в поры, последующую дегидратацию и ограничение глубокой конденсации фурфурола (формирование фуран-олигомеров), что уменьшает образование гуминов [22], т. е. проведение процесса в капиллярных системах сокращает глубину конденсации фурфурола, приводя преимущественно к олигомеризации.

Древесина лиственных пород относится к категории капиллярно-пористых материалов. Капилляры и трахеиды составляют до 40 % общего объема древесины, со средним диаметром пор для березы порядка 20–30 мкм [9, 10]. Можно предположить, что в случае проведения гидролиза гемицеллюлоз и последующей дегидратации древесина выступит не только как источник пентоз, но и как капиллярная система, исключая глубокую конденсацию фурфурола и обеспечивая высокий выход олигомеров.

Следует также отметить, что фурфурол является высокореакционным соединением и при взаимодействии с кислородом образует перекиси/гидроперекиси, инициирующие радикальную поликонденсацию. Поликонденсация протекает особенно интенсивно в присутствии минеральных кислот при температуре более 60 °С; в бескислородной среде образование олигомерных продуктов существенно подавлено [25, 31].

Объекты и методы исследования

При разработке технологии получения олигомерных смол в качестве сырья использовали опилки из окоренной березовой древесины после проведения парофазного гидролиза гемицеллюлоз. Березовые опилки с размером частиц 2–5 мм и содержанием легкогидролизуемых полисахаридов 25,17 % гидролизо-

вали при влажности 40 %. Для этого древесину влажностью 6–7 % смешивали с разбавленным раствором серной кислоты в количестве 1,0–3,0 % от массы сухой древесины и выдерживали для равномерной пропитки 12 ч. Парофазный гидролиз проводили в автоклаве при 150–160 °C в течение 30–60 мин [1], затем массу сушили при 100–140 °C в конвекции до остаточной влажности 6–12 %. В процессе сушки протекали реакции дегидратации и конденсации с формированием водонерастворимой смолы.

Аликвоты гидролизат-массы, отобранные при сушке, экстрагировали горячей водой, а экстракт и сухой остаток анализировали химическими методами в соответствии с [8, 9].

Опытные ДВП высокой плотности размером 200×200×3,2 мм формовали «сухим» способом при 180–200 °C и удельном давлении 5,6 МПа. Смолу наносили на волокно в виде 50%-го раствора путем пневматического диспергирования и высушивали до относительной влажности 7–8 %. Количество смолы составляло 15 % от массы абсолютно сухого волокна. Плиты испытывали по ТСН-20/ГОСТ 32276–2013 [6]; эмиссию формальдегида определяли перфораторным методом WKI (EN 120).

Использованы следующие физико-химические методы: ИК-спектроскопия (Фурье-спектрофотометр ФСМ-2203: 4000–400 см⁻¹, KBr), ¹³C-ЯМР (растворитель: H₂O+D₂O); гель-хроматография на сефадексе G-15 для водорастворимой фракции (стеклянная колонка 11×249, детектор рефрактометрический RI model 504 Gasukuro Kogyo, Япония; элюент – водный раствор сульфата аммония 3,0 г/л, с расходом 40 мл/ч, анализ проводили при комнатной температуре); термогравиметрический анализ (Netzsch TG 209 F1: 30–580 °C, 10 К/мин, Ar, 10–13 мг, алюминиевый тигель с проколотой крышечкой).

Результаты исследования и их обсуждение

Материальный баланс при дегидратации. На рис. 1 приведены графики изменения содержания редуцирующих (РВ), водорастворимых и нелетучих веществ в гидролизат-массе в процессе сушки при температуре 120 °C.

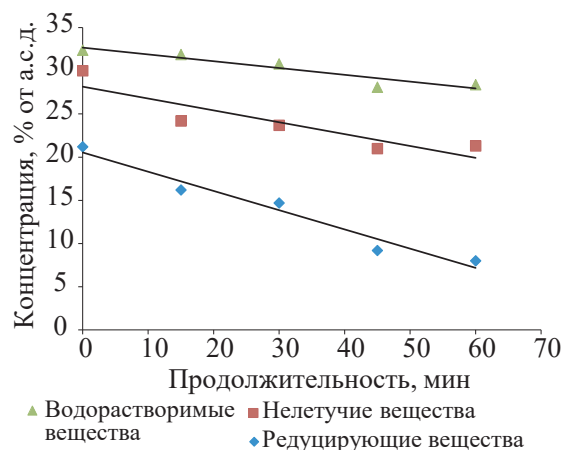


Рис. 1. Изменение содержания РВ, водорастворимых и растворимых сухих веществ в гидролизат-массе в процессе сушки при температуре 120 °C

Fig. 1. Changes in the contents of reducing substances (RS), water-soluble substances, and soluble solids in the hydrolysate mass during drying at an air temperature of 120 °C

Как видно из графиков, в процессе парофазного гидролиза более 32 % сухой массы древесины перешло в растворимое состояние. Из этого количества

28 % составляли растворимые сухие вещества, в т. ч. более 21 % РВ. Полученные данные хорошо соответствуют литературным данным по гидролизу гемицеллюлоз древесины березы [5, 9]. При сушке гидролизат-массы остаточное количество сухих веществ изменялось незначительно, в то время как уровень растворимых сухих веществ в экстракте снижался на 30 %, а РВ – более чем на 60 %. Эти изменения являются следствием кислотно-катализируемой дегидратации пентоз с образованием реакционноспособных углеводных интермедиатов и их последующей олигомеризации/карбонизации («гуминоподобные» конденсаты), что приводит к закреплению массы; накопление свободного фурфурола при этом не является определяющим фактором [17, 25, 31].

Разница между содержанием компонентов древесины, перешедших в раствор, и растворимыми сухими веществами стала следствием наличия в экстракте летучих соединений – уксусной и муравьиной кислот, удаляемых при сушке (анализ показал наличие в конденсате 17,6 г/кг уксусной и 6,6 г/кг муравьиной кислоты).

Молекулярно-массовое распределение. Для экстрактов гидролизат-массы, полученных в процессе сушки, был проведен анализ молекулярно-массового распределения (ММР) компонентов методом гель-хроматографии.

На рис. 2 представлены характерные хроматографические кривые ММР образцов экстракта, полученных сушкой гидролизат-массы при температуре 100 °С с расходом 1 л/мин. В табл. 1 показаны результаты изменения молекулярной массы компонентов экстракта в зависимости от продолжительности сушки.

Рис. 2. Хроматограммы образцов экстракта древесной дегидратационной смолы в зависимости от продолжительности сушки

Fig. 2. Chromatography of extract samples of the wood dehydration resin as a function of drying duration

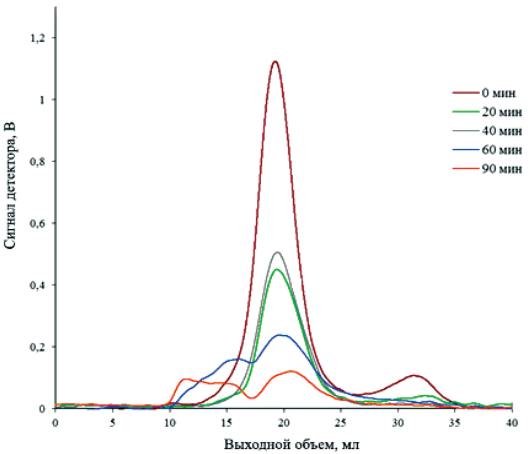


Таблица 1

Изменение молекулярной массы компонентов экстракта гидролизат-массы (%) при различной продолжительности сушки

Change in the molecular weight of the hydrolysate mass (%) extract components at different drying times

Продолжительность сушки, мин	Фракционный состав, Да				
	>700	550–700	275–550	100–275	<100
0	1,0	0,7	11,1	70,6	16,7
20	0,3	0,4	7,7	73,7	17,8
40	0,4	0,2	8,9	77,8	12,8
60	5,2	5,5	23,0	45,4	21,0
90	15,3	8,4	18,8	40,3	17,3

Как видно из табл. 1, на первой стадии сушки водорастворимые компоненты гидролизат-массы представлены в основном веществами с молекулярной массой менее 275 Да, которые элюируются с выходным объемом более 20 мл. По мере увеличения продолжительности сушки заметна конденсация растворимых продуктов с образованием более крупных олигомеров, при этом средневзвешенная молекулярная масса компонентов возрастает с 195 до 296 Да. Общее количество олигомеров с молекулярной массой выше 275 Да к окончанию сушки составляет более 40 % общей массы сухих веществ экстракта гидролизат-массы [17, 31].

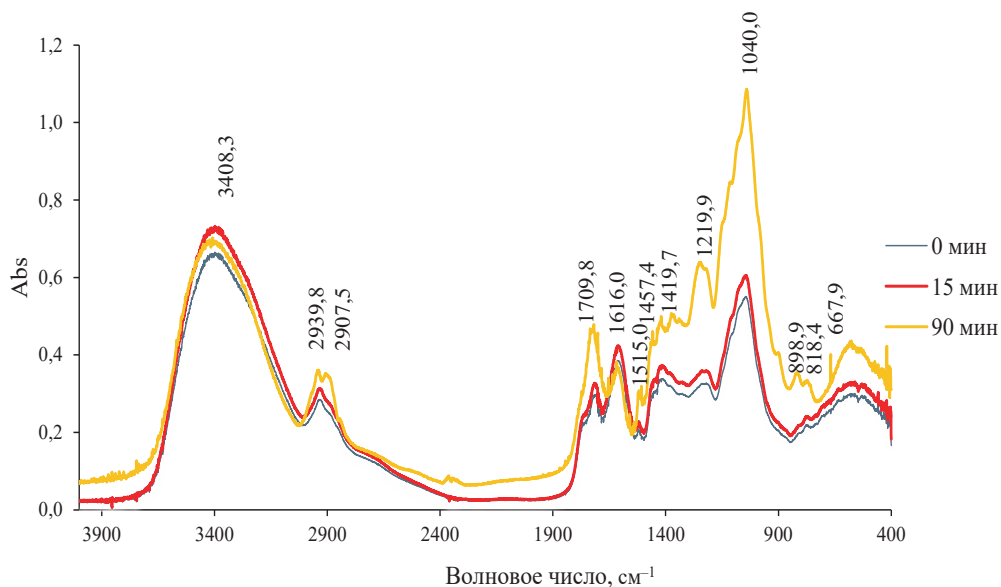


Рис. 3. ИК-спектры ДДС в процессе дегидратации при 100 °С и продолжительности 0, 15 и 90 мин

Fig. 3. IR spectra of the wood dehydration resin (WDR) during dehydration at 100 °C (0, 15 and 90 min)

ИК-спектроскопия. На основе анализа ИК-спектров (рис. 3) ДДС в процессе термообработки сделан вывод о значительных структурных изменениях компонентов экстракта. По мере протекания процесса происходит уменьшение интенсивности полос в области 3350–3400 см⁻¹, что свидетельствует о дегидратации фенольных и спиртовых гидроксильных групп. Значительное увеличение интенсивности пика при 1705–1710 см⁻¹ указывает на активное окисление боковых цепей лигнина с образованием карбонильных и, возможно, хиноидных структур. В то же время стабильность характеристических пиков ароматического скелета (1595–1605 и 1510–1515 см⁻¹) подтверждает сохранение основной ароматической структуры лигнина. На деградацию углеводного компонента указывает заметное уменьшение интенсивностей полос в области 1150–1040 см⁻¹, связанных с С–О-колебаниями целлюлозы и гемицеллюлоз. Незначительные изменения алкильных С–Н-полос (2900–2850 см⁻¹) демонстрируют относительную стабильность этих фрагментов. Уменьшение интенсивности пиков в области 1265–1270 и 1030–1040 см⁻¹ отражает умеренные структурные изменения фенольных групп и продолжающуюся деградацию углеводов, что типично для процессов отверждения.

Таким образом, процесс сушки может быть связан с конденсацией и окислением лигнина с формированием более плотной 3-мерной сетки, что объясняет повышение гидрофобности и термостабильности конечной смолы.

^{13}C ЯМР. Анализ спектров ^{13}C ЯМР ДДС до и после термообработки выявил заметные структурные преобразования (рис. 4).

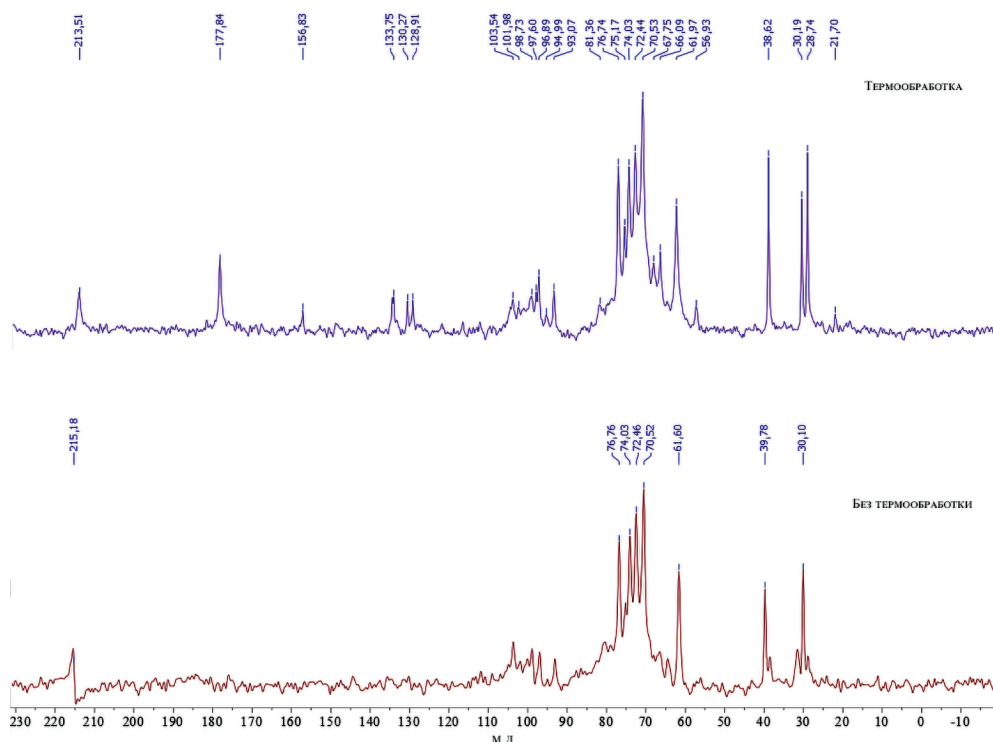


Рис. 4. ^{13}C ЯМР-спектры ДДС до и после термообработки ($\text{H}_2\text{O}+\text{D}_2\text{O}$, 300 МГц)

Fig. 4. ^{13}C NMR spectra of WDR before and after heat treatment ($\text{H}_2\text{O}+\text{D}_2\text{O}$, 300 MHz)

Приведены характерные спектры ядерного магнитного резонанса ^{13}C для образцов смолы, использованных в ИК-спектроскопии, после их растворения в смеси H_2O и D_2O .

После термообработки горячим воздухом в течение 90 мин при 100 °C наблюдается отчетливый рост сигналов в области 170–180 м. д. (карбонильные центры $\text{C}=\text{O}$ карбоновых кислот/эфиров, возможно лактонов) и усиление полос 60–80 м.д., соответствующих О-алкил-углероду в спиртах, простых и ацетальных фрагментах ($\text{C}-\text{O}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$). При этом область 90–110 м. д. выражена слабо, а характерный арилметоксильный пик ≈ 55 м. д. ($\text{Ar}-\text{O}-\text{CH}_3$) практически не проявляется; следовательно, нет оснований говорить о заметной «ароматизации» и доминировании оформленных фурановых или «классических лигниновых» доменов. В алифатической зоне 20–40 м. д. спектр усложняется (рост распределения сигналов метиленовых и мостиковых $\text{C}-\text{C}$), что указывает на повышение степени конденсации. Термообработка переводит систему из водорастворимой смеси низкомолекулярных углеводных производных к более окисленной и конденсированной сетевой структуре с увеличением доли карбонильных групп ($\text{C}=\text{O}$) и кислородсодержащих связей ($\text{C}-\text{O}/\text{C}-\text{O}-\text{C}$), что сопровождается снижением растворимости и ростом термостойкости.

При этом в условиях кислых сред конденсация фурфурола сопровождается гидролитическим раскрытием цикла [17, 25, 31], и реакция описывается как превращение ненасыщенной циклической структуры в алифатические продукты с открытой цепью.

Соотнесение данных ИК- и ЯМР-спектров позволяет сделать вывод об изменениях химической структуры при термической трансформации древесной смолы. ИК-спектры демонстрируют снижение интенсивности поглощения для широкой полосы $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ (O–H) и в области $1150\text{--}1040\text{ см}^{-1}$ (C–O, C–O–C углеводов) при одновременном гиперхромном эффекте при $1700\text{--}1740\text{ см}^{-1}$ (C=O). Эти изменения согласуются с ЯМР-данными: увеличением сигналов 170–180 м. д. (C=O) и перераспределением 60–80 м. д. (C–O/C–O–C), указывая на дегидратационно-конденсационные преобразования углеводной фазы. При этом выраженных ароматических маркеров структуры лигнина (арилметоксильный ~ 55 м. д. в ЯМР и характерные ароматические полосы $\sim 1510\text{ см}^{-1}$ в ИК) не наблюдается, что не позволяет уверенно приписать структуру фуранам или сохраненному лигниновому скелету. Совместная интерпретация ИК+ЯМР указывает на дегидратационно-окислительную перестройку углеводной структуры с формированием «гуминоподобной» конденсированной сетки (преимущественно C–O–C-мостики и C–C-сшивки, рост доли C=O), что и объясняет переход смолы к более гидрофобному, термостойкому состоянию после отверждения.

Термогравиметрический анализ (ТГА/ДТГ). Сопоставление кривых ТГА рис. 5 показывает, что мягкая сушка без отверждения (№ 1) приводит к ранней и интенсивной потере массы уже при $\sim 150\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$, основной спад наблюдается в интервале $200\text{--}320\text{ }^{\circ}\text{C}$, а углеродный остаток минимален ($\sim 34\%$), что соответствует набору водорастворимых фуран-олигомеров без сформированной пространственной структуры.

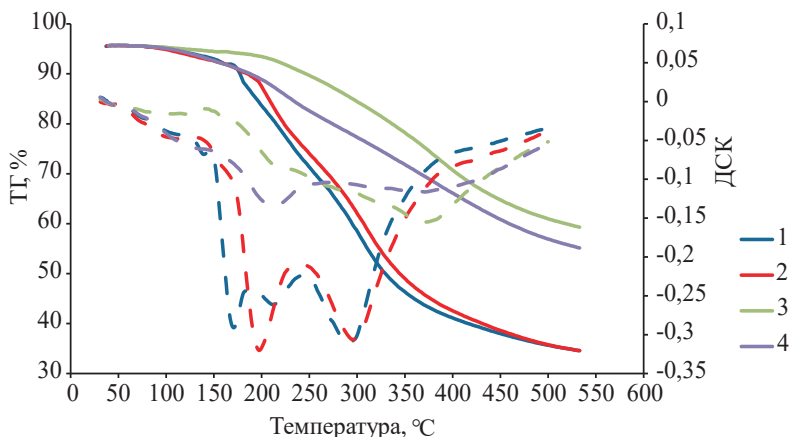


Рис. 5. Термогравиметрия образцов смол № 1–4.

ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия

Fig. 5. Thermogravimetric analysis of resin samples 1–4.

ДСК – differential scanning calorimetry

Отверждение при $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ при pH 7 (№ 2) делает разложение более растянутым и двухступенчатым, повышая термическую стойкость и остаток до $\sim 42\%$. Добавление $6,5\%$ H_2SO_4 (№ 3) усиливает процессы дегидратации-конденсации: кривая теряет резкие провалы, масса убывает более плавно, а угле-

родный остаток достигает максимума (~60 %), что указывает на образование плотной, нерастворимой сетки. То есть степень конденсации и карбонизации матрицы увеличиваются вследствие кислотного катализа и нагрева. При 12 % H_2SO_4 (№ 4) высокий остаток сохраняется (~56 %), однако возрастает доля низкотемпературного распада (~150–300 °C), что свидетельствует о появлении термолabileльных фрагментов при избыточной кислотности.

В целом для формирования нерастворимой отвержденной массы оптимален режим с ~6–7 % H_2SO_4 и отверждением при 180 °C; мягкая сушка не формирует сети, а чрезмерно кислые условия ухудшают стойкость в среднем температурном диапазоне. Подобные тренды (сдвиг ТГ-пиков, рост нерастворимого остатка при введении кислот/органокислот) хорошо задокументированы для танин-сахарозных и цитратных систем [17, 22, 28, 31].

Реология/отверждение. Водный экстракт гидролизат-массы, нейтрализованный известью и упаренный до концентрации 50 % сухих веществ, используемый для формования ДКМ, представляет собой смолу темно-коричневого цвета со слабым фруктовым ароматом. Смола не растворима в ацетоне, хлороформе, хлористом метиле, диэтиловом эфире, трихлорметане, этилацетате и тетрагидрофуране; частично растворима в этаноле и изопропанол; хорошо растворима в слабых растворах кислот и щелочей. При нагревании до температуры более 140 °C смола желатинизируется с образованием твердой хрупкой массы, растворимой в воде и с хорошей адгезией к металлу и стеклу. Плотность ДДС при концентрации сухих веществ 50 % составляет 1050–1100 кг/м³; условная вязкость по ВЗ-4 – 17–20 с; pH 5%-го раствора смолы – 4,0–6,0; продолжительность желатинизации при 180 °C – 22–27 с.

Слабые минеральные и органические кислоты в процессе желатинизации не изменяют растворимости смолы в воде. Крепкие минеральные кислоты (серная, хлористоводородная и фосфорная), прибавленные к смоле, приводят к образованию после желатинизации нерастворимой в воде массы (рис. 6).

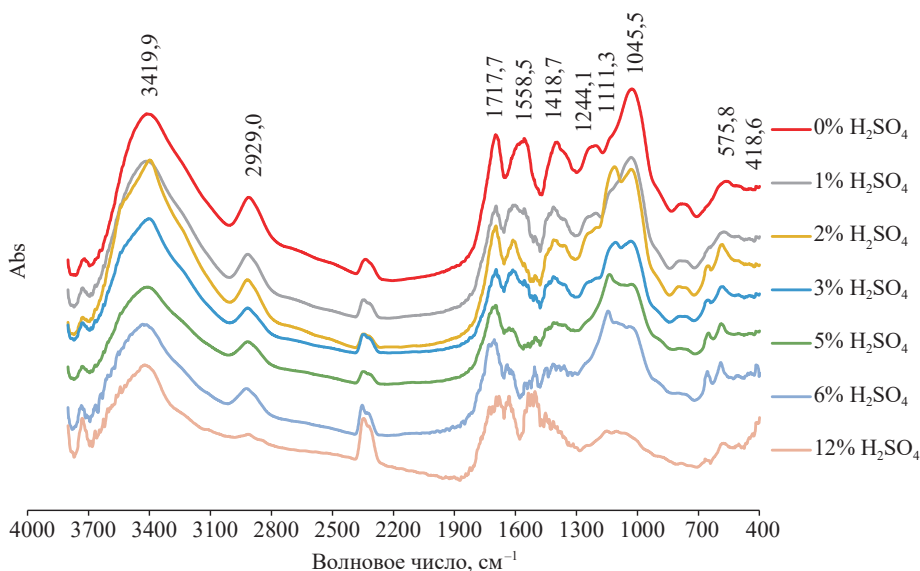


Рис. 6. ИК спектры отвержденных ДДС при 180 °C с разной концентрацией кислоты (0–12% H_2SO_4)

Fig. 6. IR spectra of WDR cured at 180 °C with different acid concentrations (0–12% H_2SO_4)

Варьирование концентрации серной кислоты в составе смолы приводит к последовательным и качественным изменениям ее химической структуры. Наблюдается прогрессирующее уменьшение интенсивности полосы в области $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$, связанное с потреблением гидроксильных групп в реакциях конденсации. Динамика интенсивности пика при $1700\text{--}1740\text{ см}^{-1}$ ($\text{C}=\text{O}$) имеет сложный характер: начальное увеличение при 1–3 % кислоты свидетельствует об образовании карбонильных групп в результате дегидратации, с последующим снижением из-за их потребления кислоты 6–12 % при углублении конденсации. Усиление области $1500\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ может отражать рост доли конъюгированных $\text{C}=\text{C}$ и $\text{C}=\text{O}$ в конденсированных продуктах дегидратации углеводов, а значительное снижение интенсивности в области $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ отражает деструкцию углеводного компонента.

В табл. 2 приведены данные по температуре и продолжительности процесса и растворимости ДДС с различным содержанием серной кислоты после проведения желатинизации.

Таблица 2

Продолжительность желатинизации и растворимость ДДС при различных температурах и концентрациях серной кислоты
Gel time and solubility of WDR at various temperatures and sulfuric acid concentrations

Температура желатинизации, °С	Концентрация кислоты, % от сухих веществ смолы	Продолжительность желатинизации, с	Растворимость смолы
150	—	Более 120	Полная
160	—	86	
180	—	28	
180	5	34	Частичная
180	6	32	Нерастворима
180	10	32	
180	12	31	

Как видно из табл. 2, высокая скорость желатинизации ДДС достигается только при температуре более 180 °C , что характерно для фурановых смол [8] и значительно превосходит показатель для карбамидоформальдегидной смолы. Желатинизация смолы без добавления серной кислоты не изменяет растворимость смолы в воде, а при концентрации кислоты в смоле более 6 % от массы сухих веществ приводит к образованию нерастворимой в воде массы. Рост добавки H_2SO_4 до ~6–7 % сопровождается увеличением доли карбонизованной фазы и углеродного остатка, тогда как при 12 % наблюдается более ранняя деструкция при нагреве.

Свойства ДВП. С использованием ДДС были сформованы ДВП высокой плотности из технического древесного волокна березы со степенью помола 12 °ШР.

В табл. 3 приведены параметры качества ДВП в зависимости от количества серной кислоты, поданной на отверждение. Как видно из данных табл. 3, кислота способствует получению плит с повышенной влажостойкостью. Большая часть готовых образцов по прочности на изгиб соответствует требованиям ТСН-20, а по разбуханию заметно их превосходит.

Таблица 3

Параметры качества ДВП в зависимости от количества серной кислоты, поданной на отверждение
Quality parameters of HDF depending on the amount of sulfuric acid supplied for curing

Катализатор, % от а.с.м	Плотность, кг/м³	Прочность при изгибе, МПа	Разбухание по толщине, %	Водопоглощение по массе, %
0	925	38,7	Разрушение	
0,14	982	27,6	22,9	55,5
0,28	833	20,2	13,1	69,0
0,56	937	20,4	15,0	45,7
0,84	878	22,8	20,6	63,8
1,40	913	25,8	10,7	50,0

Примечание: Удельное время прессования – 1,0 мин/мм.

Древесная дегидратационная смола имеет высокую температуру желатинизации, и, следовательно, при прессовании для прогрева всей массы плиты необходимо более длительное время. В табл. 4 приведены параметры качества ДВП в зависимости от удельного времени прессования.

Таблица 4

Параметры качества ДВП в зависимости от удельного времени прессования (количество серной кислоты, поданной на отверждение 1,4 % от а.с.д.)
Quality parameters of HDF depending on specific pressing time (amount of sulfuric acid supplied for curing 1.4 % of absolutely dry mass)

Удельное время прессования, мин/мм	Плотность, кг/м³	Прочность при изгибе, МПа	Разбухание по толщине, %	Водопоглощение по массе, %
1,00	863	24,5	6,3	51,0
0,50	908	24,6	13,1	51,6
0,30	931	24,7	19,1	53,6
0,20	920	20,6	20,4	54,4
0,15	933	20,0	21,4	55,1

Данные табл. 4 показывают, что с увеличением продолжительности прессования прочность и в особенности водостойкость ДВП значительно увеличиваются. Анализ эмиссии формальдегида, выполненный по методу WKI, показал его содержание на уровне 1,7 мг/100 г.

Сравнительный анализ показывает, что типичные ДВП на КФС имеют более высокую прочность: при варьировании расхода смолы был установлен диапазон прочности при изгибе 40,50–46,93 МПа, однако при этом разбухание за 24 ч составляло около 8,17–8,86 %, а водопоглощение за 24 ч – 17,0–19,7 %. При этом добавка лигносульфоната кальция к КФС [14] ухудшает водостойкость и снижает прочность: прочность при изгибе падает с 41,80 до 36,50–39,92 МПа, а водопоглощение растет с 23,26 до 29,09–42,90 %. Исследование биоадгезивов, полученных в ходе работы [21], показывает, что ДВП с добавлением крафт-лигнина в количестве 15 % имеют прочность при изгибе 45–48 МПа, водопоглощение 9,0–9,5 % и разбухание 4,0–4,2 %. ДВП на основе белковых изолятов из рисовой соломы с химически модифицированным соевым белком показывают прочность при изгибе 21,8 МПа, разбухание 24,53 % и водопоглощение 64,35 %, что сопоставимо с показателями для ДДС [34].

В целом материалы на основе ДДС имеют более высокую водостойкость в холодной воде, в то время как ДВП на основе КФС полностью разрушаются. Прочность ДВП с ДДС несколько ниже по сравнению с КФС, но не меньше требований ГОСТа. Улучшение влагостойкости плит при умеренном каталитическом режиме согласуется с ТГА-данными о большей степени конденсации.

Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность создания конкурентоспособного клеящего вещества для ДКМ на основе возобновляемого лигноцеллюлозного сырья. Это соответствует парадигме биоэкономики, направленной на создание замкнутых производственных циклов с максимальной переработкой биомассы [2, 15, 20].

Предложенная технология парофазного гидролиза с последующей сушкой/дегидратацией позволяет получать олигомерную смолу непосредственно в массе древесного сырья, минуя стадию выделения и очистки дорогостоящего фурфурола [4]. Такой подход значительно снижает энергозатраты и себестоимость конечного продукта, что является критически важным для его промышленной реализации. Использование в процессе собственной капиллярной структуры древесины [9, 22] для управления реакцией конденсации является инновационным решением.

Как показывают данные по качеству ДВП (см. табл. 3, 4), материалы на основе ДДС обладают высокой водостойкостью, что является значительным преимуществом по сравнению с традиционными карбамидоформальдегидными смолами [3]. Низкий уровень эмиссии формальдегида (1,7 мг/100 г) делает данные материалы безопасными для использования в жилищном строительстве.

Оптимизация режимов прессования и дозировки катализатора (серной кислоты) позволяет управлять свойствами конечного материала, как это видно из данных ИК-спектроскопии и табл. 2–4.

Полученные ИК/ЯМР-данные и зависимость свойств ДКМ от дозировки H_2SO_4 согласуются с известной ролью кислот в ускорении дегидратации сахаров до фуранов и снижении температур отверждения в биосистемах (например, танино-сахарозных адгезивах) [12, 17, 18, 29, 27, 30]. Водостойкость полученных ДВП заметно повышена относительно нейтральных/немодифицированных систем и ряда крахмальных/соевых составов, но остается ниже показателей, демонстрируемых в ряде публикаций по лигниносодержащим и гибридным клеям [18, 19, 26, 32], а технологические параметры (температура и продолжительность процесса) могут быть дополнительно оптимизированы за счет управления кислотностью и влагосодержанием сырья.

Таким образом, разработанная древесно-дегидратационная смола представляет собой практический пример успешной реализации принципов биоэкономики и биорефайнинга в области производства древесных плит, предлагая экологичную и перспективную альтернативу нефтехимическим клеям.

Заключение

Представлена лабораторная схема биорефайнинга возобновляемого растительного сырья, где древесная дегидратационная смола получена из гемицеллюлоз. Спектральными данными показано, что система переходит от водорас-

творимой низкомолекулярной смеси к более конденсированной структуре; при 180 °С смола желатинизируется за 22–27 с, а при добавке $\geq 6\%$ H_2SO_4 формирует водонерастворимую массу; термогравиметрия фиксирует рост термостабильного остатка с максимумом при умеренной кислотности ($\sim 6\text{--}7\%$ H_2SO_4). Образцы древесноволокнистых плит высокой плотности показывают практически применимость: разбухание за 24 ч $\sim 6\text{--}21\%$, низкая эмиссия формальдегида 1,7 мг/100 г и прочность, соответствующая требованиям для интерьерных плит. В совокупности это подтверждает потенциал древесной дегидратационной смолы как бесформальдегидного биоадгезива из возобновляемого сырья, отвечающего целям биоэкономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахтиярова А.В., Пименов С.Д., Сизов А.И. Гидролиз гемицеллюлоз древесины при ультразвуковых концентрациях серной кислоты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 201–212.

Bakhtiyarova A.V., Pimenov S.D., Sizov A.I. Hydrolysis of Wood Hemicelluloses at Ultra-Low Sulfuric Acid Concentrations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 201–212. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-201-212>

2. Васильев В.В. Актуальные технологические проблемы производства синтетических смол и древесных плит // Изв. СПбЛТА. 2020. № 230. С. 173–186.

Vasilyev V.V. Current Technological Problems in the Production of Synthetic Resins and Wood-Based Panels. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, iss. 230, pp. 173–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.230.173-186>

3. Кондратьев В.П., Кондращенко В.И., Шредер В.Е. Синтетические смолы в деревообработке. СПб.: Политехн. ун-т, 2013. 412 с.

Kondrat'yev V.P., Kondrashchenko V.I., Shreder V.E. *Synthetic Resins in Wood Processing*. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2013. 412 p. (In Russ.).

4. Морозов Е.Ф. Производство фурфурола. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 199 с.

Morozov E.F. *Furfural Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 199 p. (In Russ.).

5. Патент 2723875 РФ МПК C1. Способ получения фурфурольной смолы на основе гемицеллюлоз растительного сырья для склеивания древесных материалов: № 2019133722: заявл. 22.10.2019; опубл. 17.06.2020 / В.В. Васильев, А.И. Сизов.

Vasilev V.V., Sizov A.I. *Method of Producing Furfural Resin Based on Hemicelluloses of Plant Raw Material for Gluing Wood Materials*. Patent RF, no. RU 2723875 C1, 2020. 11 p. (In Russ.).

6. Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Теоретическое и экспериментальное обоснование характера взаимодействия модифицированных связующих с древесиной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 153–163.

Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Theoretical and Experimental Substantiation of the Nature of Interaction between Modified Binders and Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 153–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-153-163>

7. Соколова Е.Г., Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Влияние аэросила технического на свойства клеевых композиций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 133–144.

Sokolova E.G., Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Effect of Technical Aerosil on the Properties of Adhesive Compositions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 133–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-133-144>

8. Угрюмов С.А. Фурановые смолы в производстве клееных древесных материалов: моногр. Кострома: КГТУ, 2012. 142 с.

Ugryumov S.A. *Furan Resins in Glued Laminated Timber Production*: Monograph. Kostroma, KSTU Publ., 2012. 142 p. (In Russ.).

9. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 496 с.

Khol'kin Yu.I. *Technology of Hydrolysis Industries*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 496 p. (In Russ.).

10. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1984. 270 с.

Chudinov B.S. *Water in Wood*. Novosibirsk, Nauka SB RAS Publ., 1984. 270 p. (In Russ.).

11. Alonso D.M., Wettstein S.G., Dumesic J.A. Gamma-Valerolactone, a Sustainable Platform Molecule Derived from Lignocellulosic Biomass. *Green Chemistry*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 584–595. <https://doi.org/10.1039/C3GC37065H>

12. Ando D., Umemura K. Bond Structures Between Wood Components and Citric Acid in Wood-Based Molding. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 1, art. 58. <https://dx.doi.org/10.3390/polym13010058>

13. Ashori A., Kuzmin A. Effect of Chitosan-Epoxy Ratio in Bio-Based Adhesive on Physical and Mechanical Properties of Medium Density Fiberboards from Mixed Hardwood Fibers. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 5057. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55796-x>

14. Çamlıbel O., Ayata Ü., Peker H. Effect of Calcium Lignosulfonate Additive on Some Physical and Mechanical Properties of High-Density Fiberboard. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 2024, vol. 67(214), art. 00037. <https://doi.org/10.53502/wood-195844>

15. Dey N., Bhardwaj S., Maji P.K. Recent Breakthroughs in the Valorization of Lignocellulosic Biomass for Advancements in the Construction Industry: A Review. *RSC Sustainability*, 2025, vol. 3, iss. 8, pp. 3307–3357. <https://doi.org/10.1039/d5su00142k>

16. Dorn L., Thirion A., Ghorbani M., Olaechea L.M., Mayer I. Exploring Fully Biobased Adhesives: Sustainable Kraft Lignin and 5-HMF Adhesive for Particleboards. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 12, art. 2668. <https://doi.org/10.3390/polym15122668>

17. Gandini A., Belgacem M.N. Furans in Polymer Chemistry. *Progress in Polymer Science*, 1997, vol. 22, iss. 6, pp. 1203–1379. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(97\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(97)00004-X)

18. Lee S.H., Md Tahir P., Lum W.C., Tan L.P., Bawon P., Park B.D., et. al. A Review on Citric Acid as Green Modifying Agent and Binder for Wood. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 8, art. 1692. <https://doi.org/10.3390/polym12081692>

19. Luo J., Zhou Y., Zhang Y., Gao Q., Li J. An Eco-Effective Soybean Meal-Based Adhesive. *Polymers*, 2020, vol. 12, iss. 4, art. 954. <https://doi.org/10.3390/polym12040954>

20. Ma Y., Kou Z., Hu Y., Zhou J., Bei Y., Hu L., et al. Research Advances in Bio-Based Adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, vol. 126, art. 103444. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103444>

21. Mancera C., El Mansouri N.-E., Vilaseca F., Ferrando F., Salvado J. The Effect of Lignin as a Natural Adhesive on the Physico-Mechanical Properties of *Vitis vinifera* Fiberboards. *BioResources*, 2011, vol. 6(3), pp. 2851–2860. <https://doi.org/10.15376/biores.6.3.2851-2860>

22. O'Neill R., Ahmad M.N., Vanoye L., Aiouache F. Kinetics of Aqueous-Phase Dehydration of Xylose into Furfural Catalyzed by ZSM-5 Zeolite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, vol. 48, no. 9, pp. 4300–4306. <https://doi.org/10.1021/ie801599k>

23. Santoso M., Widyorini R., Prayitno T., Sulistyio J. Effect of Pressing Temperatures on Bonding Properties of Sucrose–Citric Acid Adhesive Boards. *Wood Research*, 2020, vol. 65, no. 5, pp. 747–756. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.5.747756>

24. Sener C., Motagamwala A.H., Alonso D.M., Dumesic J.A. Enhanced Furfural Yields from Xylose Dehydration in the γ -Valerolactone/Water Solvent System at Elevated Temperatures. *ChemSusChem*, 2018, vol. 11, iss. 14, pp. 2321–2331. <https://doi.org/10.1002/cssc.201800730>

25. Shi N., Liu Q., He X., Wang G., Chen N., Peng J., et al. Molecular Structure and Formation Mechanism of Hydrochar from Hydrothermal Carbonization of Carbohydrates. *Energy & Fuels*, 2019, vol. 33, no. 10, pp. 9904–9915. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02174>

26. Siahkamari M., Emmanuel S., Hodge D., Nejad M. Lignin–Glyoxal: A Fully Biobased Formaldehyde-Free Wood Adhesive for Interior Engineered Wood Products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, vol. 10, no. 11, pp. 4039–4050. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c06843>

27. Sun S., Zhao Z. Influence of Acid on the Curing Process of Tannin-Sucrose Adhesives. *BioResources*, 2018, vol. 13(4), pp. 7683–7697. <https://doi.org/10.15376/biores.13.4.7683-7697>

28. Tsilomelekis G., Orella M.J., Lin Z., Cheng Z., Zheng W., Nikolakis V., Vlachos D.G. Molecular Structure, Morphology and Growth Mechanisms and Rates of 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) Derived Humins. *Green Chemistry*, 2016, vol. 18, iss. 7, pp. 1983–1993. <https://doi.org/10.1039/C5GC01938A>

29. Umemura K., Ueda T., Munawar S.S., Kawai S. Application of Citric Acid as a Natural Adhesive for Wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, vol. 123, iss. 4, pp. 1991–1996. <https://doi.org/10.1002/app.34708>

30. Umemura K., Sugihara O., Kawai S. Investigation of a New Natural Adhesive Composed of Citric Acid and Sucrose for Particleboard. *Journal of Wood Science*, 2013, vol. 59, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1326-6>

31. Van Zandvoort I., Wang Y., Rasrendra C.B., van Eck E.R.H., Bruijninx P.C.A., Heeres H.J., Weckhuysen B.M. Formation, Molecular Structure, and Morphology of Humins in Biomass Conversion. *Chemistry Sustainable Energy Materials*, 2013, vol. 6, iss. 9, pp. 1745–1758. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300332>

32. Yang G., Gong Z., Luo X., Chen L., Shuai L. Bonding Wood with Uncondensed Lignins as Adhesives. *Nature*, 2023, vol. 621(7979), pp. 511–515. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06507-5>

33. Yuan J., Du G., Yang H., Liu S., Park S., Liu T., et al. Fully Bio-Based Adhesive Designed Through Lignin–Cellulose Combination and Interfacial Bonding Reinforcement. *Industrial Crops and Products*, 2023, vol. 204, part A, art. 117279. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117279>

34. Zhang W., Sun H., Zhu C., Wan K., Zhang Y., Fang Z., et al. Mechanical and Water-Resistant Properties of Rice Straw Fiberboard Bonded with Chemically-Modified Soy Protein Adhesive. *RSC Advances*, 2018, vol. 8, iss. 27, pp. 15188–15195. <https://doi.org/10.1039/C7RA12875D>

35. Zhao Z., Miao Y., Yang Z., Wang H., Sang R., Fu Y., et al. Effects of Sulfuric Acid on the Curing Behavior and Bonding Performance of Tannin–Sucrose Adhesive. *Polymers*, 2018, vol. 10(6), art. 651. <https://doi.org/10.3390/polym10060651>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare 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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.017

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-150-162

Оценка эффективности использования Na-КМЦ в технологическом потоке влагопрочной бумаги

В.В. Гораздова^{1,2}, канд. техн. наук; ResearcherID: [GWC-4729-2022](https://orcid.org/0000-0003-4732-7791),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4732-7791>

А.А. Кулебякина², инженер; ResearcherID: [NXC-3407-2025](https://orcid.org/0009-0008-7864-7900),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7864-7900>

Е.В. Дернова³, канд. техн. наук; ResearcherID: [HKE-0047-2023](https://orcid.org/0000-0002-7869-9646),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-9646>

Д.А. Дулькин^{1,2}, д-р техн. наук; ResearcherID: [HKD-9977-2023](https://orcid.org/0000-0001-6517-2979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6517-2979>

¹Компания «Объединенные бумажные фабрики», 22-й км, пос. Московский, д. 4, стр. 1, блок Б, Москва, Россия, 108811; vgorazdova@ukobf.com[✉], ddulkin@ukobf.com

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; vgorazdova@ukobf.com[✉], kulebyakina.a@edu.narfu.ru, ddulkin@ukobf.com

³АО «Троицкая бумажная фабрика», ул. Маяковского, д. 1, г. Кондрово, Калужская обл., Россия, 249831; edernova@ukobf.com

Поступила в редакцию 14.10.25 / Одобрена после рецензирования 12.01.26 / Принята к печати 13.01.26

Аннотация. Выполнен комплексный анализ эффективности использования натрий-карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ) в производстве влагопрочной бумаги. Na-КМЦ – это водорастворимая анионная модификация целлюлозы, получаемая этерификацией целлюлозы хлорацетатом натрия в щелочном растворе. Образующийся полимер отличается высоким уровнем гидрофильности благодаря наличию карбоксильных ($-\text{COO}^-$) и гидроксильных ($-\text{OH}^-$) групп, что обеспечивает высокую растворимость этого соединения в воде и формирование стабильных коллоидных растворов. Исследовано влияние Na-КМЦ на процесс подготовки бумажной массы и эксплуатационные свойства конечной продукции. Показано, что применение Na-КМЦ оказывает комплексное положительное воздействие на физико-механические, оптические и барьерные свойства бумаги. Na-КМЦ вступает в реакцию с такими компонентами бумажной массы, как древесные и синтетические волокна, наполнители и клеящие вещества, и за счет этого усиливает адгезивные свойства и улучшает общую структуру бумаги. Na-КМЦ проявляет комбинированный эффект в многокомпонентных системах, повышая активность и эффективность других химических веществ – влагопрочных смол и пигментов. В ходе работы установлены количественные соотношения, объясняющие зависимость качества бумаги от расхода Na-КМЦ. Область применения результатов охватывает производство белых видов бумаг с высокими эксплуатационными характеристиками, особенно в условиях требований снижения экологической нагрузки на стоки. Методика

© Гораздова В.В., Кулебякина А.А., Дернова Е.В., Дулькин Д.А., 2026



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

может быть адаптирована под действующие производственные линии целлюлозно-бумажных предприятий.

Ключевые слова: На-КМЦ, влагопрочная бумага, расход На-КМЦ, взаимодействие На-КМЦ, компоненты бумажной массы, влагопрочность, механическая прочность, оптические свойства, химические вспомогательные вещества

Благодарности: Исследование проведено в инновационном технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ.

Для цитирования: Гораздова В.В., Кулебякина А.А., Дернова Е.В., Дулькин Д.А. Оценка эффективности использования На-КМЦ в технологическом потоке влагопрочной бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 150–162.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-150-162>

Original article

Performance Evaluation of Na-CMC in the Wet-Strength Paper Process Flow

Victoria V. Gorazdova^{1,2✉}, *Candidate of Engineering*; ResearcherID: [GWC-4729-2022](https://orcid.org/0000-0003-4732-7791),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4732-7791>

Anastasia A. Kulebyakina², *Engineer*; ResearcherID: [NXC-3407-2025](https://orcid.org/0009-0008-7864-7900),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7864-7900>

Elena V. Dernova³, *Candidate of Engineering*; ResearcherID: [HKE-0047-2023](https://orcid.org/0000-0002-7869-9646),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-9646>

Dmitriy A. Dulkin^{1,2}, *Doctor of Engineering*; ResearcherID: [HKD-9977-2023](https://orcid.org/0000-0001-6517-2979),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6517-2979>

¹The Consolidated Paper Mills Company, 22-y km, pos. Moskovskiy, 4, str. 1, blok B, Moscow, Russia, 108811; vgorazdova@ukobf.com✉, ddulkin@ukobf.com

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002; vgorazdova@ukobf.com✉, kulebyakina.a@edu.narfu.ru, ddulkin@ukobf.com

³JSC “Troitskaya Paper Mill”, ul. Mayakovskogo, 1, Kondrovo, Kaluga Region, Russia, 249831; edernova@ukobf.com

Received on October 14, 2025 / Approved after reviewing on January 12, 2026 / Accepted on January 13, 2026

Abstract. The paper presents a comprehensive analysis of the effectiveness of sodium carboxymethylcellulose (Na-CMC) in the production of wet-strength paper. Na-CMC is a water-soluble anionic cellulose derivative produced by the esterification of cellulose with sodium chloroacetate in an alkaline solution. The resulting polymer is highly hydrophilic due to the presence of carboxyl ($-\text{COO}^-$) and hydroxyl ($-\text{OH}^-$) functional groups, which ensures the compound's high solubility in water and the formation of stable colloidal solutions. This study investigated the effect of Na-CMC on the paper pulp preparation process and the performance properties of the final product. The use of NA-CMC has been shown to have a comprehensive positive effect on the physical and mechanical, optical, and barrier properties of paper. NA-CMC reacts with paper pulp components such as wood and synthetic fibers, fillers, and binders, thereby enhancing the paper's adhesive properties and

improving its overall structure. Na-CMC is effective in multi-component systems; it enhances the activity and performance of other chemical substances, such as moisture-resistant resins and pigments. The study revealed quantitative relationships that explain how paper quality depends on the amount of NA-CMC consumed. The results are applicable to the production of high-performance white papers, particularly in terms of reducing the environmental impact of wastewater discharges. The method can be adapted to existing production lines at pulp and paper mills.

Keywords: Na-CMC, wet-strength paper, Na-CMC consumption, Na-CMC interaction, paper pulp components, wet strength, mechanical strength, optical properties, chemical additives

Acknowledgments: The research was carried out at the Innovative Facilities Engineering and Innovation Center “Advanced Northern Bioresources Processing Technologies” of the Northern (Arctic) Federal University (NArFU).

For citation: Gorazdova V.V., Kulebyakina A.A., Dernova E.V., Dulkan D.A. Performance Evaluation of Na-CMC in the Wet-Strength Paper Process Flow. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 150–162. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-150-162>

Введение

В производстве бумаги и картона активно применяются различные химические вспомогательные вещества, позволяющие повысить физико-механические свойства бумаги [2, 4, 6]. Одним из таких реагентов является натрий-карбоксиметилцеллюлоза (Na-КМЦ), которая представляет собой искусственный анионный полимер на основе целлюлозы.

Научные исследования применения Na-КМЦ при переработке целлюлозы и производстве влагопрочной бумаги становятся все более востребованными. Актуальность таких исследований обусловлена необходимостью повышения качества бумаги при одновременном снижении затрат на ее изготовление. Использование Na-КМЦ позволяет решать сразу несколько технологических задач – от улучшения удержания наполнителей и мелкого волокна до повышения прочностных характеристик конечного продукта. При этом эффективность применения данного реагента во многом зависит от условий его введения и взаимодействия с другими компонентами бумажной массы [1, 8–10, 17–22, 27].

Цель работы – исследовать эффективность использования Na-КМЦ в производстве влагопрочной бумаги.

Задачи: определить влияние Na-КМЦ на процесс подготовки бумажной массы; установить зависимость свойств готовой продукции от введения в композицию Na-КМЦ; выявить оптимальный расход химических вспомогательных веществ при изготовлении влагопрочной бумаги высокого качества.

Новизна работы заключается в системности подхода к изучению влияния Na-КМЦ на процесс подготовки бумажной массы и эксплуатационные характеристики влагопрочной бумаги. Исследование охватывает широкий спектр вопросов, касающихся оптимального выбора дозировок, методов введения реагента и комплексного анализа его воздействия на разные стадии технологического процесса, а также на свойства готовой продукции. Результаты вносят существенный вклад в развитие теории и практики производства влагопрочной бумаги, способствуя повышению конкурентоспособности отечественной целлюлозно-бумажной промышленности [3, 5, 11–13, 23–26].

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали пробы бумажной массы из товарной беленой целлюлозы – лиственной и хвойной – и модельные образцы готовой влагопрочной бумаги.

Степень помола массы определяли на аппарате Шоппер-Риглера в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 «Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям».

Электрокинетические свойства бумажной массы устанавливали по методам производителя Müttek. Вследствие выраженного гетерогенного характера среды электрокинетические свойства бумажной массы часто нельзя выразить только одним параметром, и поэтому используют несколько показателей. Наиболее распространенными являются электрокинетический потенциал (ζ -потенциал), образующийся при контакте растительных волокон с полярными жидкостями, а также катионная потребность (КП) как мера присутствия интерферирующих веществ в волокнистом полуфабрикате [1, 7, 14–16].

Для определения структурно-морфологических характеристик волокон использовали анализатор системы Fiber Tester, который позволяет оперативно измерять параметры отдельных волокон, формировать массивы данных и выполнять их обработку.

Для оценки гидрофобных свойств бумаги определяли поверхностную впитываемость воды при одностороннем смачивании по методу Кобба₆₀ в соответствии с ГОСТ 12605–97 ИСО 535–91 «Бумага и картон. Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)».

Для оценки печатных свойств бумаги определяли белизну и непрозрачность в соответствии с ГОСТ 30113–94 (ИСО 2470–77) «Бумага и картон. Метод определения белизны».

Минеральный остаток после озоления (зольность бумаги) при температуре 575 °С устанавливали в соответствии с ГОСТ 7629–93 (ИСО 2144–87) «Бумага и картон. Метод определения зольности».

Качество лабораторных образцов оценивали по следующим физико-механическим показателям: прочности при растяжении в соответствии с ГОСТ ИСО 1924-1–96 «Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Часть 1. Метод нагружения с постоянной скоростью»; влагопрочности по ГОСТ 13525.7–68 «Бумага и картон. Методы определения влагопрочности»; сопротивлению продавливанию в соответствии с ГОСТ Р ИСО 2759–2017 «Картон. Метод определения сопротивления продавливанию».

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе эксперимента проведена оценка влияния расхода Na-КМЦ на процесс подготовки бумажной массы и качество готовой продукции.

Размол лиственных и хвойных беленых полуфабрикатов производили раздельно в мельнице Йокро в диапазоне степени помола 36...38 °ШР.

Расход Na-КМЦ варьировали в диапазоне 2,2; 5,0 и 10,0 кг/т. Дозирование указанных расходов осуществляли непосредственно в размалывающие стаканы.

В ходе лабораторных исследований было обнаружено, что Na-КМЦ не растворяется в холодной воде, поэтому подобрали температуру растворения химиката в горячей воде, которая составила порядка 70 °С.

Далее составляли композицию по волокну из 70 % лиственной беленой целлюлозы (ЛБЦ) и 30 % хвойной беленой целлюлозы (ХБЦ), после чего изготавливали лабораторные образцы (отливки) массой 1 м² 40 г, которые после кондиционирования в стандартных условиях подвергали физико-механическим испытаниям.

Для оценки качества бумажной массы использовали следующие параметры: продолжительность размола (рис. 1), ζ-потенциал и катионную потребность (табл. 1), а также структурно-морфологические характеристики (табл. 2).

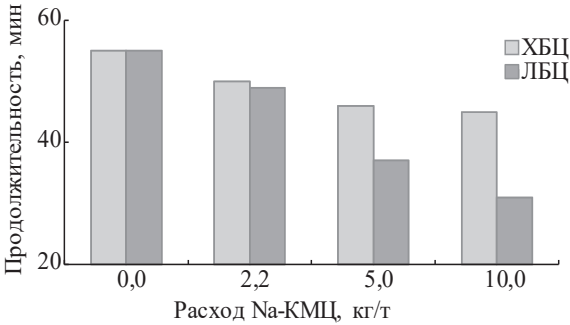


Рис. 1. Продолжительность размола ЛБЦ и ХБЦ
Fig. 1. Grinding duration of bleached hardwood pulp (ЛБЦ) and bleached softwood pulp (ХБЦ)

Подтверждено, что с увеличением расхода Na-КМЦ снижается продолжительность размола. Это происходит за счет повышения гидрофильности волокон, улучшения их смачивания и диспергирования, а также снижения межволоконного трения.

Таблица 1

Электрокинетические показатели бумажной массы
Electrokinetic properties of paper pulp

Расход Na-КМЦ, кг/т	ζ, мВ	КП, мг·экв/л
—	–21,9	34,1
2,2	–27,6	35,6
5,0	–32,4	39,2
10,0	–33,7	62,4

Так, продолжительность размола хвойной целлюлозы снижается на 20 %, а лиственной – почти в 2 раза (на 45 %). Для размола волокон хвойных трахеид требуется больше времени, чем для размола лиственного либриформа. Это связано с тем, что в лиственных породах содержание гемицеллюлоз, которые непосредственно участвуют в процессе размола, выше, чем в хвойных. Поэтому для лиственной целлюлозы при увеличении расхода Na-КМЦ значительно снижается продолжительность размола.

Таблица 2

Структурно-морфологические характеристики бумажной массы
Structural and morphological characteristics of paper pulp

Образец	Расход Na-КМЦ, кг/т	Среднее			Доля мелочи, %	Грубость, мкг/м
		длина волокна, мм	ширина волокна, мкм	фактор формы, %		
ХБЦ	0	1,99	27,4	82,7	4,3	216
	2,2	1,76	30,3	86,1	6,1	225

Окончание табл. 2

Образец	Расход Na-КМЦ, кг/т	Среднее			Доля мелочи, %	Грубость, мкг/м
		длина волокна, мм	ширина волокна, мкм	фактор формы, %		
ХБЦ	5,0	1,75	30,2	86,7	6,1	224
	10,0	1,73	30,3	86,4	5,9	212
ЛБЦ	0	0,91	20,7	89,3	3,1	137
	2,2	0,94	22,9	91,2	3,2	140
	5,0	0,95	22,8	91,2	3,1	139
	10,0	0,94	22,9	91,2	3,3	130

Поскольку Na-КМЦ является анионным химикатом, то при повышении его расхода наблюдается снижение ζ -потенциала, а потребность в катионах возрастает. При помощи Na-КМЦ можно также регулировать электрокинетические показатели бумажной массы перед отливом.

Анализ, выполненный с помощью анализатора волокна Fiber Tester, подтвердил разделение волокон в полном объеме до заданной степени помола. Структурно-морфологические характеристики волокон оказались идентичными, что свидетельствует о равномерности помола. Растворы Na-КМЦ обладают высокой вязкостью, это снижает подвижность целлюлозных волокон в растворе. Следовательно, при повышенных расходах Na-КМЦ усиливается рубка волокон, вызванная механическим перемешиванием и воздействием размалывающего оборудования, что приводит к образованию более коротких волокон. Рост ширины волокна обусловлен раздавливающим действием, возникающим при размоле сильно набухших волокон в условиях повышенного расхода Na-КМЦ.

При увеличении расхода Na-КМЦ продолжительность размола снижается, причем наибольшее снижение наблюдается для лиственной целлюлозы. Это объясняется повышенным содержанием гемицеллюлоз (примерно в 1,5 раза больше, чем в хвойных). Гемицеллюлозы активно участвуют в процессе размола, и Na-КМЦ, способствуя облегчению и ускорению разрушения клеточных стенок волокон, делает их более податливыми к обработке.

Для оценки качества готовой продукции контролировали следующие показатели (рис. 2): прочность при растяжении, удельную прочность при разрыве ($P_{уд}$), абсолютное сопротивление продавливанию (BST), впитываемость при одностороннем смачивании по методу Кобба, разрывную длину (L), разрушающее напряжение (σ_p), деформацию при разрушении (ϵ_p), жесткость при разрушении (St), начальный модуль упругости (E_1), работу разрушения (A_p).

Прочностные характеристики (σ_p , BST, L , $P_{уд}$, E_1) возрастают на 25...30 % в диапазоне расхода Na-КМЦ от 0 до 5 кг/т. Прочность максимальна при расходе Na-КМЦ 5 кг/т. Снижение этих показателей при добавлении 10 кг/т Na-КМЦ связано с минимальной продолжительностью размола.

Деформация при разрушении ϵ_p растет во всем диапазоне увеличения расхода химиката на 10 %. Работа разрушения A_p максимальна при расходе 5 кг/т.

Впитываемость при одностороннем смачивании ухудшается на 12 % с использованием Na-КМЦ, что ограничивает расход данного химиката для влагопрочных видов бумаг, а также не соответствует описанию данного продукта производителем.

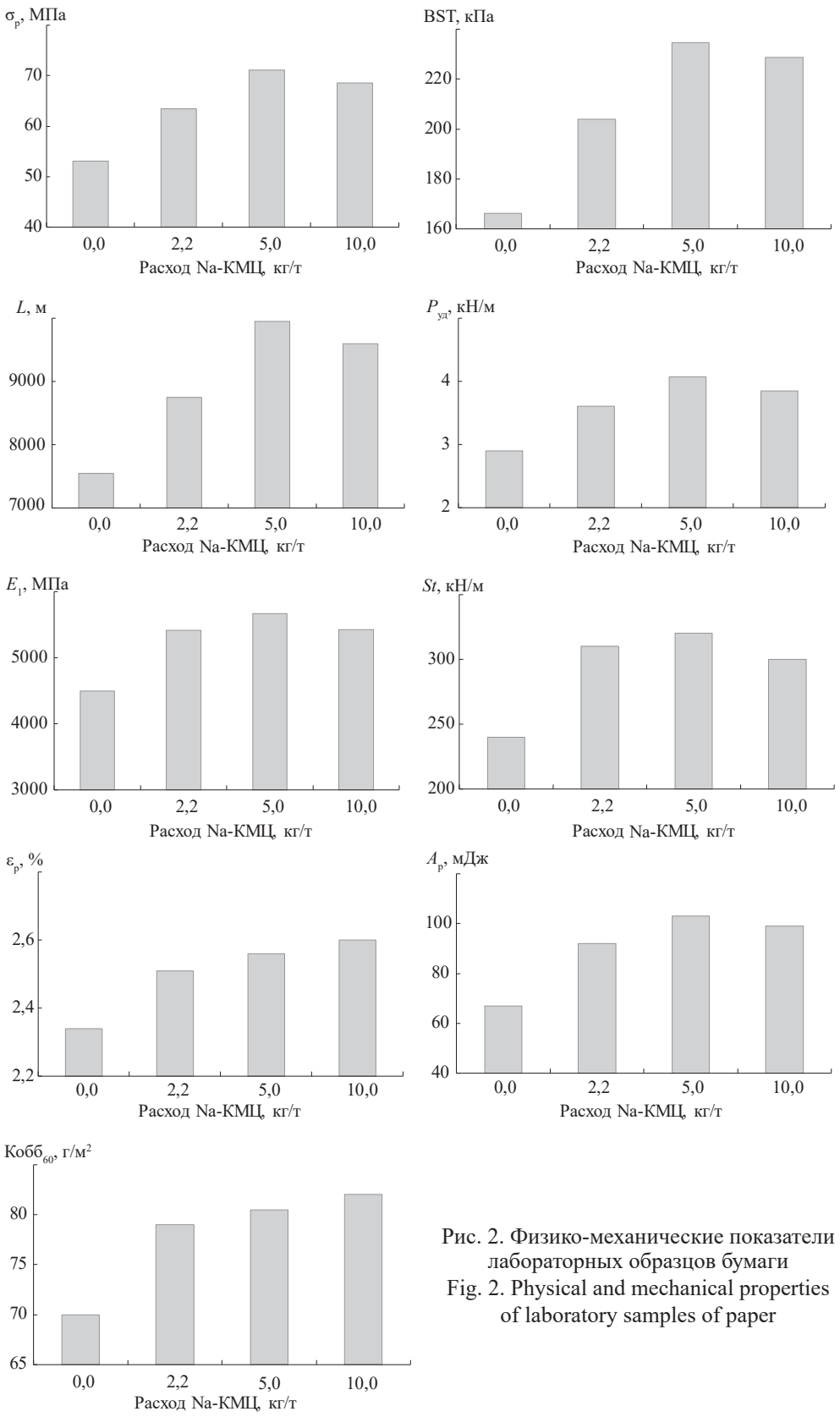


Рис. 2. Физико-механические показатели лабораторных образцов бумаги
Fig. 2. Physical and mechanical properties of laboratory samples of paper

Кривые на рис. 3 подтверждают, что расход Na-КМЦ 5 кг/т является оптимальным для достижения прочности готового продукта.

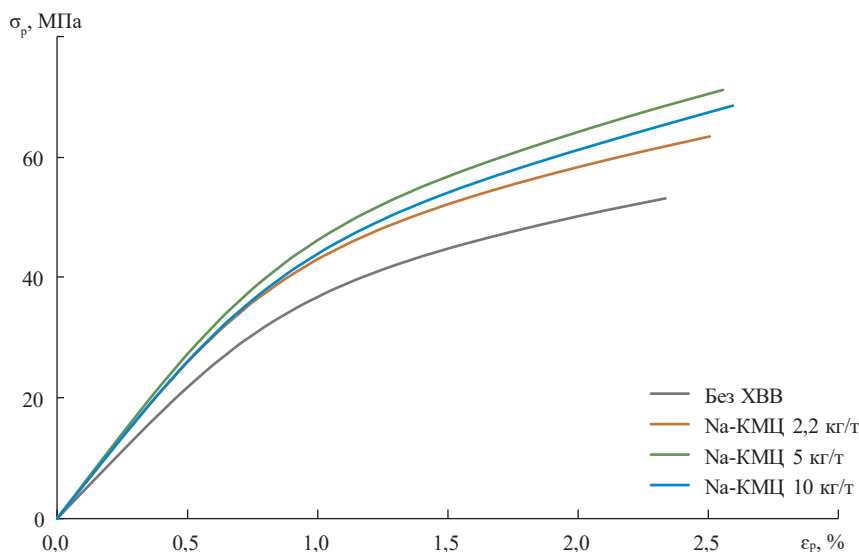


Рис. 3. Зависимость «напряжение–деформация» для лабораторных образцов бумаги (ХВВ – химическое вспомогательное вещество)

Fig. 3. Stress-strain relationship of laboratory samples of paper (ХВВ – chemical excipient)

На следующем этапе оценили качество влагопрочной бумаги, изготовленной в лабораторных условиях с использованием Na-КМЦ в количестве 5 кг/т.

Лабораторные образцы производили как на первом этапе исследования. В бумажную массу в размалывающий стакан добавляли Na-КМЦ. После размол в массу вводили оптическое отбеливающее вещество – 0,95 кг/т; мел – 250 или 350 кг/т; алкилкетендимер – 5,8 кг/т; крахмал – 5 кг/т; влагопрочную смолу – 5,6 кг/т; удерживающий агент – 1,0 кг/т; коагулянт – 3,0 кг/т. Крахмал использовали для повышения качества готовых образцов и удержания наполнителя.

На рис. 4 продемонстрированы физико-механические показатели влагопрочной бумаги, в композиции которой содержится мел и крахмал.

При повышении расхода мела с 250 до 350 кг/т снижаются все физико-механические характеристики влагопрочной бумаги. Это обусловлено тем, что при высоком содержании наполнителя в бумаге уменьшаются межволоконные силы связи, а следовательно, и качественные характеристики образцов.

Крахмал повышает прочность бумаги, а также увеличивает удержание наполнителя и мелкого волокна в структуре бумажного листа.

Выявлено, что при расходе мела 250 кг/т сопротивление продавливанию соответствует требуемому, а при расходе 350 кг/т не попадает в норму, но при добавлении крахмала повышается до необходимых даже при максимальном расходе мела. Жесткость при растяжении имеет аналогичную тенденцию.

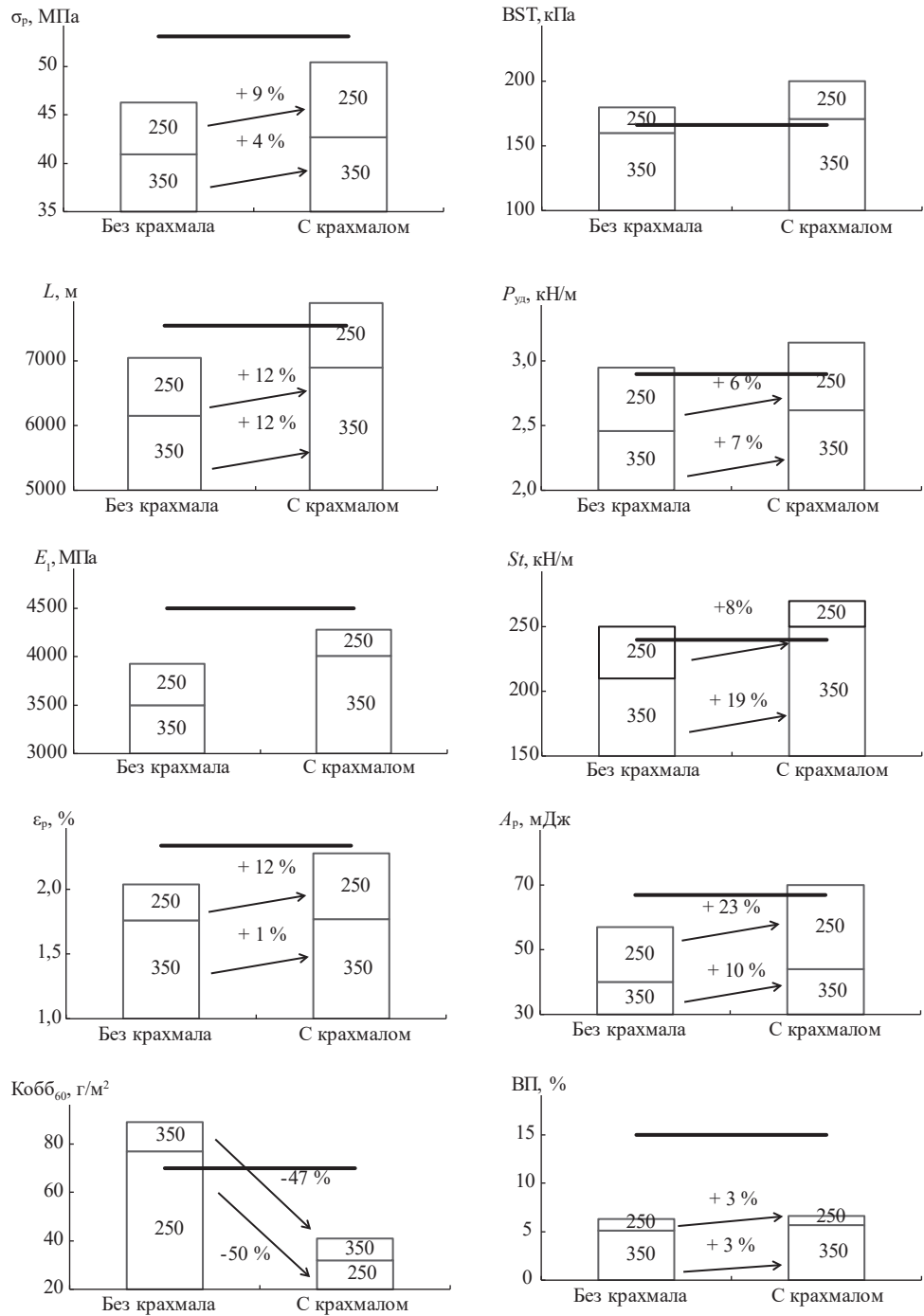


Рис. 4. Физико-механические показатели лабораторных образцов влагопрочной бумаги с добавлением мела и крахмала. Числовые значения на диаграммах – расход мела, кг/т. Черная горизонтальная линия – показатель для влагопрочной бумаги без наполнителя и крахмала (норма). ВП – влагопрочность

Fig. 4. Physical and mechanical properties of laboratory samples of wet-strength paper containing whiting and starch. The numerical values on the graphs represent whiting consumption, kg/t. The black horizontal line indicates the values for wet-strength paper without fillers or starch (reference standard). ВП – wet strength

Разрывная длина, удельная прочность при разрыве и работа разрушения соответствуют норме лишь при добавлении мела 250 кг/т в присутствии крахмала.

Разрушающее напряжение, начальный модуль упругости и деформация разрушения не попадают в норму даже в случае применения крахмала.

Впитываемость при использовании крахмала снижается в 2 раза, что свидетельствует о повышении гидрофобности образцов.

Влагопрочность образцов бумаги без крахмала при увеличении расхода мела снижается на 3 %. При введении крахмала прирастает на те же 3 % для каждого расхода мела. Нормативная влагопрочность составила 15 %, что граничит с влагопрочностью при добавлении мела в количестве 250 или 350 кг/т в сочетании с крахмалом.

Проведен анализ печатных свойств (белизны и непрозрачности) влагопрочной бумаги (рис. 5). Мел повышает печатные свойства, в т. ч. белизну и непрозрачность. Так, при использовании мела белизна увеличилась на 2 %, а непрозрачность – на 3 %. Оба показателя соответствуют нормам даже без использования крахмала.

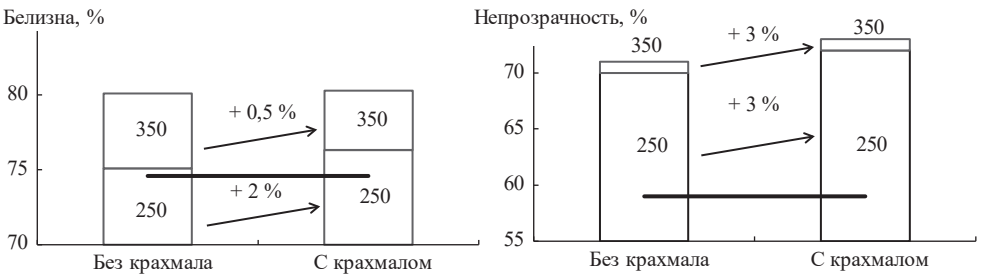


Рис. 5. Печатные свойства влагопрочной бумаги с добавлением мела и крахмала

Fig. 5. Printing properties of wet-strength paper containing whiting and starch

В табл. 3 представлена зольность полученной влагопрочной бумаги. По результатам исследования лабораторных образцов методом озольнения установлено, что увеличение расхода мела на 100 кг/т повышает зольность с 7,4 до 8,3 %. Применение крахмала улучшает удержание наполнителя.

Таблица 3

Зольность лабораторных образцов
Ash content of laboratory samples

Расход, кг/т		Зольность, %
мела	крахмала	
250	—	7,4
	100	8,4
350	—	8,3
	100	9,6

При расходе мела 250 кг/т в случае добавления крахмала достигается аналогичная зольность, соответствующая показателю при расходе мела 350 кг/т без применения крахмала. Зольность возрастает с 8,4 до 9,6 % при использовании крахмала.

Таким образом, для изготовления влагопрочной бумаги с применением На-КМЦ без потери уровня физико-механических показателей необходим расход мела 250 кг/т и крахмала – 5 кг/т.

Выводы

1. Рекомендуется перед использованием Na-КМЦ для варки влагопрочной бумаги предварительно растворить его в горячей воде.
2. С увеличением расхода Na-КМЦ продолжительность размола хвойной целлюлозы снижается на 20 % и лиственной – до 45 %.
3. Оптимальный расход Na-КМЦ составил 5 кг/т, при котором достигаются максимальные прочностные характеристики лабораторных образцов бумаги.
4. Для изготовления влагопрочной бумаги с использованием Na-КМЦ без потери уровня физико-механических показателей необходимо добавлять мел в количестве 250 кг/т и крахмал – 5 кг/т.
5. Na-КМЦ эффективен при включении его в технологический поток влагопрочной бумаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Денисова М.Н., Будаева В.В., Минаев К.М. Физико-химические свойства полисахаридных реагентов, основным компонентом которых является натрий карбоксиметилцеллюлоза // Материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием. 2016. С. 457–464.
Denisova M.N., Budayeva V.V., Minayev K.M. Physical and Chemical Properties of Polysaccharide Agents Containing Sodium Carboxymethyl Cellulose as the Main Component. *Proceedings of the 9th All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists with International Participation*. 2016, pp. 457–464. (In Russ.).
2. Дернова Е.В., Гораздова В.В., Гурьев А.В., Дулькин Д.А., Дернов А.И., Окулова Е.О. Практикум по технологии бумаги и картона. Часть I. Анализ полуфабрикатов, химикатов и бумажной массы. Архангельск: САФУ, 2022. 88 с.
Dernova E.V., Gorazdova V.V., Guryev A.V., Dulkan D.A., Dernov A.I., Okulova E.O. *Workshop on Paper and Cardboard Technology. Part I. Analysis of Semi-Finished Products, Chemicals and Paper Pulp*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2022. 88 p. (In Russ.).
3. Махотина Л.Г. Технология целлюлозных композиционных материалов. Современные тенденции в технологии мелованных видов бумаги и картона. СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т промышл. технологий и дизайна. Высш. шк. технологии и энергетики, 2021. 76 с.
Makhotina L.G. *Cellulosic Composite Materials Technology. Current Trends in the Coated Paper and Cardboard Technology*. Saint Petersburg, SUTD VShTE Publ., 2021. 76 p. (In Russ.).
4. Осипов П.В. Эффективное использование химических вспомогательных веществ в производстве бумаги и картона: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2008. 32 с.
Osipov P.V. *Efficient Use of Chemical Auxiliaries in Paper and Cardboard Production*: Dr. Engin. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2008. 32 p. (In Russ.).
5. Пинягина Н.Б., Горшенина Н.С. Современное состояние, тенденции и перспективы развития целлюлозно-бумажной промышленности Российской Федерации // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 6. С. 148–160.
Pinyagina N.B., Gorshenina N.S. Current State, Trends and Development Prospects of the Pulp and Paper Industry of the Russian Federation. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 148–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-6-148-160>
6. Рыбин Е.А., Аксенчик К.В. Натрий-карбоксиметилцеллюлоза и способы ее получения // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 1. Вологда: Маркер, 2017. С. 30–32.
Rybin E.A., Aksenchik K.V. Sodium Carboxymethyl Cellulose and Methods for Its Production. *Science Today: Global Challenges and Mechanisms of Development: Proceedings*

of the International Scientific and Practical Conference: In 2 Vol. Vol. 1. Vologda, Marker Publ., 2017, pp. 30–32. (In Russ.).

7. Стась И.Е., Батищева И.А. Относительная вязкость водных растворов Na-карбоксиметилцеллюлозы и ее изменение в зависимости от кислотности среды, температуры и воздействия электромагнитного поля // Химия растит. сырья. 2018. № 3. С. 23–31.

Stas I.E., Batishcheva I.A. Relative Viscosity of Aqueous Solutions of Na-Carboxymethyl Cellulose and Its Change Depending on the Acidity of the Medium, Temperature and Exposure to an Electromagnetic Field. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of plant raw materials, 2018, no. 3, pp. 23–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033695>

8. Тарасов С.М. Химические вспомогательные средства в производстве целлюлозных композиционных материалов. М.: Московск. гос. ун-т леса, 2016. 37 с.

Tarasov S.M. *Chemical Auxiliary Agents in the Production of Cellulose Composite Materials*. Moscow, MSFU Publ., 2016. 37 p. (In Russ.).

9. Трескова В.И., Шипина О.Т., Романова С.М., Никитин В.Г. Химическая модификация карбоксиметилцеллюлозы диаминофуразаном // Вестн. технол. ун-та. 2016. Т. 19, № 12. С. 172–175.

Treskova V.I., Shipina O.T., Romanova S.M., Nikitin V.G. Chemical Modification of Carboxymethyl Cellulose with Diaminofurazan. *Herald of Technological University*, 2016, vol. 19, no. 12, pp. 172–175. (In Russ.).

10. Хованский В.В., Дубовый В.К., Кейзер П.М. Применение химических вспомогательных веществ в производстве бумаги и картона. Ч. 2. СПб.: С.-Петерб. гос. технол. ун-т растит. полимеров, 2013. 72 с.

Khovanskiy V.V., Dubovyy V.K., Keyzer P.M. *Use of Chemical Auxiliaries in Paper and Cardboard Production*. Part 2. Saint Petersburg, SPbGTURP Publ., 2013. 72 p. (In Russ.).

11. Черная Н.В., Карпова С.В., Мисюров О.А., Гордейко С.А., Чернышева Т.В., Дашкевич С.А. Свойства мелованных видов бумаги и картона в зависимости от вида и содержания связующих веществ в нанесенном покрытии // Тр. БГТУ. Сер. 2. 2020. № 1. С. 160–172.

Chernaya N.V., Karpova S.V., Misyurov O.A., Gordeyko S.A., Chernysheva T.V., Dashkevich S.A. Properties of Coated Paper and Cardboard Depending on the Type and Content of Binders in the Coating. *Proceedings of BSTU. Series 2*, 2020, no. 1, pp. 160–172. (In Russ.).

12. Черная Н.В., Шашок Ж.С., Усс Е.П., Дашкевич С.А., Мисюров О.А. Повышение эффективности проклейки волокнистых суспензий в нейтральной и слабощелочной средах (обзор) // Тр. БГТУ. Сер. 2. Химич. технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 1(265). С. 36–54.

Chernaya N.V., Shashok Zh.S., Uss E.P., Dashkevich S.A., Misyurov O.A. Improving the Efficiency of Sizing of Fibrous Suspensions in Neutral and Weak Alkaline Media (Review). *Proceedings of BSTU. Ser. 2, Chemical technologies, biotechnology, geoecology*, 2023, no. 1(265), pp. 36–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2023-265-1-5>

13. Чернова В.В., Котышов М.С., Лаздин Р.Ю., Кулиш Е.И. Изучение реологических свойств растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер.: Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 163–169.

Chernova V.V., Kotyashov M.S., Lazdin R.Yu., Kulish E.I. Study of Rheological Properties of Sodium Salt Solutions of Carboxymethyl Cellulose. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 163–169. (In Russ.). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-2-163-169>

14. Шачнева Е.Ю., Магомедова З.А., Малачиева Х.З. Изучение физико-химических свойств частиц карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) в водных растворах // Техника и технология пищевых производств. 2014. № 1. С. 152–156.

Shachneva E.Yu., Magomedova Z.A., Malachieva Kh.Z. Study of Physico-Chemical Properties of Carboxymethyl Cellulose in Aqueous Solutions. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2014, no. 1, pp. 152–156. (In Russ.).

15. Abe T.O., Lajide L., Owolabi B.J., Adebayo A.O., Ogunjobi J.K., Oluwasina O.O. Synthesis and Application of Carboxymethyl Cellulose from *Gliricidia sepium* and *Cola gigantea*. *BioResources*, 2018, vol. 13(3), pp. 6077–6097. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.6077-6097>
16. Ambjörnsson H.A., Schenzel K., Germgård U. Carboxymethyl Cellulose Produced at Different Mercerization Conditions and Characterized by NIR FT Raman Spectroscopy in Combination with Multivariate Analytical Methods. *BioResources*, 2013, vol. 8(2), pp. 1918–1932. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1918-1932>
17. Hivechi A., Bahrami S.H., Arami M., Karimi A. Ultrasonic Mediated Production of Carboxymethyl Cellulose: Optimization of Conditions Using Response Surface Methodology. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 134, pp. 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.07.045>
18. Hubbe M.A., Gill R.A. Fillers for Papermaking: A Review of Their Properties, Usage Practices, and Their Mechanistic Role. *BioResources*, 2016, vol. 11(1), pp. 2886–2963. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.Hubbe>
19. Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J.T., Ras R.H.A. Publisher Correction: Surface-Wetting Characterization Using Contact-Angle Measurements. *Nature Protocols*, 2018, vol. 14, art. 2259. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0047-0>
20. Kono H., Oshima K., Hashimoto H., Shimizu Y., Tajima K. NMR Characterization of Sodium Carboxymethyl Cellulose: Substituent Distribution and Mole Fraction of Monomers in the Polymer Chains. *Carbohydrate Polymers*, 2016, vol. 146, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.021>
21. Lee J., Park S., Roh H.-G., Oh S., Kim S., Kim M., et al. Preparation and Characterization of Superabsorbent Polymers Based on Starch Aldehydes and Carboxymethyl Cellulose. *Polymers*, 2018, vol. 10(6), art. 605. <https://doi.org/10.3390/polym10060605>
22. Mohkami M., Talaeipour M. Investigation of the Chemical Structure of Carboxylated and Carboxymethylated Fibers from Waste Paper via XRD and FTIR Analysis. *BioResources*, 2011, vol. 6(2), pp. 1988–2003. <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.1988-2003>
23. Panchan N., Wattanapan P., Sungsinchai S., Roddech S., Dittanet P., Seubsai A., et al. Optimization of Synthesis Conditions for Carboxymethyl Cellulose from Pineapple Leaf Waste Using Microwave-Assisted Heating and Its Application as a Food Thickener. *BioResources*, 2021, vol. 16(4), pp. 7684–7701. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7684-7701>
24. Rahman M.S., Hasan M.S., Nitai A.S., Nam S., Karmakar A.K., Ahsan M.S., et al. Recent Development of Carboxymethyl Cellulose. *Polymers*, 2021, vol. 13, iss. 8, art. 1345. <https://doi.org/10.3390/polym13081345>
25. Su L., Ou Y., Feng X., Lin M., Li J., Liu D., et al. Integrated Production of Cellulose Nanofibers and Sodium Carboxymethylcellulose Through Controllable Eco-Carboxymethylation Under Mild Conditions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, vol. 7, iss. 4, pp. 3792–3800. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04492>
26. Wei J., Zhou Y., Lv Y., Wang J., Jia C., Liu J., et al. Carboxymethyl Cellulose Nanofibrils with a Treelike Matrix: Preparation and Behavior of Pickering Emulsions Stabilization. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, vol. 7, iss. 15, pp. 12887–12896. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01822>
27. Yu P., Hou Y., Zhang H., Zhang W., Yang S., Ni Y. Characterization and Solubility Effects of the Distribution of Carboxymethyl Substituents Along the Carboxymethyl Cellulose Molecular Chain. *BioResources*, 2019, vol. 14(4), pp. 8923–8934. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.8923-8934>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interests

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Краткое сообщение

УДК 712.41

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-163-174

Устойчивость кустарников на объектах озеленения г. Красноярска по показателю жизненного состояния*Е.В. Авдеева*[✉], *д-р с.-х. наук, проф.*; ResearcherID: [GLR-2803-2022](https://orcid.org/0000-0003-3425-7157),ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3425-7157>*Н.В. Цыганкова, аспирант*; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9284-9679>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; e.v.avdeeva@gmail.com[✉], irw@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.25 / Одобрена после рецензирования 20.06.25 / Принята к печати 22.06.25

Аннотация. Определены адаптационные способности кустарников в условиях г. Красноярска: в скверах, в составе парковых композиций, на улицах и в питомниках – в городских и пригородных зонах. Анализ совокупности техногенных, рекреационных и микроклиматических условий, негативно влияющих на рост и развитие растений, позволил установить, что в удовлетворительных условиях расположен питомник муниципального предприятия, в напряженных – 2 объекта, в конфликтных – 15, в критических – 4. Насаждения с удовлетворительными условиями находятся в пригородной зоне. Критическими условиями отличаются территории вдоль автомагистралей, вблизи производственных предприятий с высоким уровнем вредных выбросов. Объекты озеленения с напряженными экологическими условиями пролегают вблизи улиц со средней интенсивностью движения транспорта и умеренным загрязнением воздуха; с конфликтными – возле автодорог с высокой транспортной загруженностью, нарушением градостроительных норм при посадке растений, наличием вредных производственных предприятий. Жизненное состояние растений г. Красноярска оценивается от здорового до отмирающего, индекс жизненного состояния варьирует от 99 до 15 и может выступать индикатором степени влияния экологических факторов на кустарники. На основании сравнительного анализа кустарники выстроены в ряд по степени чувствительности (от наиболее устойчивого к менее жизнеспособному) к техногенным нагрузкам урбосреды: сирень венгерская – смородина двуиглая – кизильник блестящий – карагана древовидная – жимолость татарская. На основании полученных данных по устойчивости кустарников разработаны рекомендации по их использованию на различных типах объектов озеленения: сирень венгерская и смородина двуиглая рекомендуются для посадки как в парках, так и вдоль магистралей с интенсивным движением; кизильник блестящий, карагана древовидная – в парках и скверах; жимолость татарская – в парках и на объектах с низким уровнем антропогенных нагрузок.

Ключевые слова: объекты озеленения, городское озеленение, кустарники в городском озеленении, техногенная нагрузка на растения, устойчивость растений, чувствительность растений к техногенным нагрузкам, индекс жизненного состояния, Красноярск



Для цитирования: Авдеева Е.В., Цыганкова Н.В. Устойчивость кустарников на объектах озеленения г. Красноярска по показателю жизненного состояния // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 163–174. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-163-174>

Brief report

Tolerance of Shrubs at the Krasnoyarsk's Landscaping Facilities in Terms of Their Vitality Index

Elena V. Avdeeva✉, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [GLR-2803-2022](https://orcid.org/0000-0003-3425-7157),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3425-7157>

Natalia V. Tsygankova, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9284-9679>
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, Russia, 660037;
e.v.avdeeva@gmail.com✉, irw@mail.ru

Received on April 8, 2025 / Approved after reviewing on June 20, 2025 / Accepted on June 22, 2025

Abstract. The present study is aimed at determining the adaptability of shrubs in the landscaping conditions of Krasnoyarsk: squares, parks, streets, and nurseries in the urban and suburban areas of the city. An analysis of the combination of anthropogenic, recreational, and microclimatic conditions that negatively affect plant growth and development revealed that the municipal enterprise's nursery is in satisfactory conditions, 2 objects are in stressful conditions, 15 are in adverse conditions, and 4 are in critical conditions. Plantings growing in satisfactory conditions are located in the suburban area. Critical conditions are typical for areas along highways and near industrial enterprises with high levels of harmful emissions. Landscaping facilities with stressful environmental conditions are located near streets with moderate traffic volume and moderate air pollution; facilities with adverse conditions are located near roads with heavy traffic, violations of urban planning regulations regarding plant spacing, and the presence of harmful industrial enterprises. The vitality status of plants in Krasnoyarsk ranges from healthy to dying. The vitality index (VI) varies from 99 to 15 and can serve as an indicator of the extent to which environmental factors affect shrubs. The shrubs are ranked in order of sensitivity (from the most tolerant to the least tolerant) to anthropogenic stresses in the urban environment: *Syringa josikaea* Jacq. → *Ribes diacanthum* Pall. → *Cotoneaster lucidus* Schltdl. → *Caragana arborescens* Lam. → *Lonicera tatarica* L. Recommendations have been developed for the use of shrubs in various types of landscaping facilities based on data regarding their tolerance. *Syringa josikaea* Jacq. and *Ribes diacanthum* Pall. are recommended for planting in parks as well as along highways with heavy traffic; *Cotoneaster lucidus* Schltdl. and *Caragana arborescens* Lam. are recommended for planting in parks and squares; *Lonicera tatarica* L. is recommended for planting in parks and at sites with low anthropogenic loads.

Keywords: landscaping facilities, urban landscaping, shrubs in urban landscaping, anthropogenic stress to plants, plant tolerance, plant sensitivity to anthropogenic stress, vitality status, Krasnoyarsk

For citation: Avdeeva E.V., Tsygankova N.V. Tolerance of Shrubs at the Krasnoyarsk's Landscaping Facilities in Terms of Their Vitality Index. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 163–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-163-174>

Введение

Экологическая оптимизация городской среды с целью формирования благоприятных санитарно-гигиенических условий и эстетического воздействия на население, обеспечения комфортности городской среды представляет собой одну из приоритетных задач ландшафтного строительства. Эффективно спроектированная система городского озеленения, как в комплексе, так и в ее составных частях, существенно влияет на основные характеристики экологического состояния города. Озеленение, включающее парки, скверы, бульвары и другие элементы, оказывает заметное воздействие на экологические параметры города. Комплексный подход к озеленению позволяет улучшить качество воздуха, снизить уровень шума и создать благоприятные условия для отдыха и рекреации [1, 15, 16, 18, 19].

Кустарниковые растения играют существенную роль в поддержании экологического баланса городов, оказывая положительное влияние на здоровье населения на нескольких уровнях, включая дыхательную, зрительную и психоэмоциональную сферы [2, 6, 8, 9, 12, 14, 17, 22, 23]. Вместе с тем растительность в городах подвергается воздействию как естественных факторов, характерных для данной местности, так и специфических антропогенных стрессоров, что негативно сказывается на внешнем виде насаждений, продолжительности их жизни и вызывает преждевременное ухудшение состояния [4, 7, 16, 20].

Жизненное состояние древесных растений является отражением интегрального влияния условий окружающей среды. Современные методы зеленого мониторинга используют учет крон древесных растений, характеризующихся изреженностью, уменьшением плотности, увеличением ажурности, поврежденностью ассимиляционного аппарата и др. Применение показателя «индекс жизненного состояния» (ИЖС) позволяет оценивать степень повреждения насаждений в условиях урбосреды в основном под действием антропогенной нагрузки. В ряде исследований [5, 13, 21] установлены зависимости жизненного состояния древесных растений от факторов городской среды.

Деревья, произрастающие в условиях г. Красноярска, относятся к следующим категориям жизненного состояния: слабо поврежденные клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), яблоня ягодная (*Malus baccata* Borkh.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), черемуха Маака (*Padus maackii* Kom.), рябина сибирская (*Sorbus sibirica* Hedl.); сильно поврежденные береза повислая (*Betula pendula* Roth.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.), тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.). У экземпляров перечисленных видов зафиксировано наличие усыхающих ветвей в апикальной части кроны; снижение плотности хвои или листвы на побегах; признаки заболеваний листового аппарата и некрозно-раковые поражения; повреждения, вызванные вредителями, травмы механического происхождения. Таким образом, виды демонстрируют различную резистентность к комплексному влиянию факторов урбанизированной среды. При этом повреждения рассмотренных видов аналогичны, однако интенсивность проявления зависит от уровня антропогенных нагрузок на территориях произрастания растений [2].

При этом почти отсутствуют основанные на ИЖС данные об устойчивости кустарниковых видов г. Красноярска. В связи с этим актуальность на-

стоящего исследования определяется недостаточным объемом информации об адаптивности и устойчивости кустарников в г. Красноярске, при том, что их наличие необходимо для улучшения качества городской среды.

Цель исследования заключается в определении степени устойчивости основных видов кустарников г. Красноярска к комплексу факторов городской среды. Полученные в ходе исследования данные позволят научно обосновать выбор видов кустарников, перспективных для использования в городском озеленении на территориях с определенным уровнем антропогенной нагрузки.

Объекты и методы исследования

Изучено жизненное состояние 5 видов кустарников: сирени венгерской (*Syringa josikaea* Jacq.), кизильника блестящего (*Cotoneaster lucidus* Schldtl.), караганы древовидной (*Caragana arborescens* Lam.), смородины двулистной (*Ribes diacanthum* Pall.) и жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.). Кустарники произрастают на объектах озеленения г. Красноярска различного функционального назначения, а именно в 8 скверах, 4 парках и 9 насаждениях, расположенных вдоль городских улиц и проспектов. При этом на данных объектах за насаждениями обеспечивается одинаковый уход в соответствии с нормативной документацией муниципального предприятия «Управление зеленого строительства». В исследование также включены кустарники, произрастающие в питомнике декоративных растений этого же предприятия, с целью оценки их состояния и дальнейшей адаптации к городским условиям.

Классификация условий произрастания насаждений в городской среде проведена по методике, учитывающей влияние ландшафтных, антропогенных, градостроительных, рекреационных факторов, оказывающих негативное воздействие на рост древесных растений, а также соблюдение требований к уходу за насаждениями [1, 3]. Выделено 4 типа условий произрастания растений на объектах озеленения: I тип – удовлетворительные условия, отмеченные в насаждениях пригородных зон, в частности, в питомнике; II тип – напряженные, на территориях преимущественно вблизи улиц со средней интенсивностью движения транспорта, умеренным загрязнением воздуха; III тип – конфликтные, с высокой автотранспортной загруженностью дорог, нарушением градостроительных норм при посадке растений, наличием вредных производственных предприятий и др.; IV тип – критические, на территориях, прилегающих к магистралям с интенсивным движением, особенно на перекрестках, местах образования дорожных заторов, вдоль основных транспортных артерий и на их разделительных полосах, вблизи производственных предприятий с высоким уровнем вредных промышленных выбросов [1, 10, 11]. Представленная классификация объектов озеленения по типам условий произрастания положена в основу исследования. Распределение исследуемых объектов по условиям произрастания показало, что в удовлетворительных условиях расположен питомник, в напряженных – 2 объекта, в конфликтных – 15 и в критических – 4 (табл. 1).

На каждом объекте, включая питомник, проведена инвентаризация, которая выявила, что для камеральных исследований статистическими методами кустарники обследованы в необходимых количествах. Суммарно на объектах (за исключением питомника) было изучено около 16 тыс. экземпляров: сирень венгерская – 7576 шт., кизильник блестящий – 1560 шт., ка-

рагана древовидная – 2570 шт., смородина двуиглая – 551 шт. и жимолость татарская – 3178 шт. На каждой территории произведена диагностика всех особей данных видов.

Таблица 1

**Средние с ошибкой ИЖС кустарников на объектах озеленения г. Красноярск
в зависимости от типа условий произрастания**
**Averages with an error in the shrub VI at the Krasnoyarsk's landscaping facilities,
depending on growing conditions**

Тип условий произрастания	Объект озеленения	Сирень венгерская	Кизильник блестящий	Карагана древовидная	Смородина двуиглая	Жимолость татарская
I	Питомник	98,83±0,55	99,07±0,08	98,37±0,78	98,5±0,55	99,03±0,46
II	Сквер ул. Устиновича	83,25±0,01	–	–	–	–
II	Сквер «Фестивальный»	85,21±0,03	–	–	–	85,14±2,16
III	Сквер «Победителей»	71,25±1,34	79,01±2,81	–	–	–
III	Сквер им. А.С. Пушкина	85,04±2,08	–	–	–	70,01±2,14
III	Парк «Гвардейский»	73,75±0,96	83,21±2,31	78,65±1,12	–	70,90±2,02
III	Парк «Кировский»	–	76,10±2,48	70,32±2,19	–	–
III	Ул. Тельмана	73,02±1,14	–	74,24±2,16	–	–
III	Парк «Троя»	72,75±1,25	72,8±12,45	72,91±1,45	–	–
III	Ул. Железнодорожников	74,20±1,22	–	70,06±0,74	–	–
III	Сквер «Уют»	71,53±1,64	–	–	78,81±1,48	–
III	Сквер на ул. Железнодорожников	80,54±1,28	–	–	–	–
III	Сквер на ул. Матросова	79,02±1,22	–	72,52±1,31	–	66,05±2,55
III	Сквер «Панюковка»	71,00±0,81	–	85,31±1,44	–	64,25±1,32
III	Ул. Судостроительная	69,35±1,35	–	76,28±2,23	–	–
III	Площадь им. В. Маяковского	77,01±1,39	–	82,16±2,58	79,62±1,27	–
III	Парк им. 1 мая	70,01±1,31	81,11±1,38	89,52±1,32	–	70,12±1,89
III	Ул. Юности	83,51±1,29	79,02±4,76	63,51±2,11	–	–
IV	Ул. Калинина	69,53±3,61	–	70,12±0,12	74,91±0,31	–
IV	Просп. Мира	67,12±4,29	–	–	–	–
IV	Просп. им. газеты «Красноярский рабочий»	66,53±3,32	61,12±3,35	58,56±0,41	66,91±0,72	55,05±0,32
IV	Сквер «Одесский»	–	–	61,33±0,44	67,60±0,67	55,61±0,13

Устойчивость видов установлена посредством изучения их жизненного статуса. Состояние кустарников оценено с помощью интегрированного метода, объединяющего методологию В.А. Алексеева и визуальную инспекцию структуры кроны [5]. Согласно методике, растения классифицировались как здоровые при ИЖС в границах 80–100 %, поврежденные – 50–79 %, ослабленные –

20–49 %, отмирающие – ниже 19 % [4, 5, 7]. Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета программ MS Office Excel, Statistica 10.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования устойчивости кустарников по ИЖС (табл. 1) позволили установить степень влияния типа условий городской среды, который варьирует от удовлетворительного до критического.

В зависимости от экологических условий исследуемые виды имеют различный внешний габитус, отражающий их жизненное состояние, которое в целом по городу оценивается от здорового до отмирающего, ИЖС варьирует от 99 до 55, закономерно снижаясь в критических условиях произрастания. В табл. 2 приведены средние статистические данные и степень вариативности ИЖС кустарниковых растений, произрастающих в различных типах условий среды г. Красноярска.

Таблица 2

Статистические показатели ИЖС кустарников по типам условий произрастания на объектах озеленения г. Красноярска
The statistics on the shrub VI by growing conditions at the Krasnoyarsk's landscaping facilities

Тип условий произрастания	M, см	M _{max} , см	M _{min} , см	σ	±m	σ ²	V, %	P, %	t _{0,5}
Сирень венгерская									
I	98,83	99,20	97,40	0,96	0,55	0,93	0,97	0,56	176,91
II	85,23	85,25	85,21	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	4261,50
III	75,14	83,51	69,35	4,45	1,28	19,80	9,52	1,72	58,09
IV	67,70	70,12	58,56	6,03	3,48	36,42	6,96	5,50	18,17
Смородина двуликая									
I	98,50	99,20	97,40	0,96	0,55	0,93	0,97	0,56	176,91
III	77,77	79,62	74,91	2,51	1,45	6,34	3,23	1,86	53,49
IV	67,26	67,60	66,90	0,49	0,35	0,25	0,73	0,52	192,14
Карагана древовидная									
I	98,37	99,20	96,80	1,35	0,78	1,84	1,38	0,79	125,48
III	75,96	89,52	63,51	8,31	2,77	69,05	10,95	3,65	27,37
IV	63,34	70,12	58,56	6,03	3,48	36,42	3,52	5,50	18,17
Кизильник блестящий									
I	99,07	99,20	98,90	0,15	0,08	0,02	0,15	0,08	1123,31
III	78,52	83,20	72,80	3,67	2,60	13,53	4,68	3,31	30,17
Жимолость татарская									
I	99,03	99,80	98,20	0,81	0,46	0,64	0,81	0,46	213,85
III	68,32	70,90	64,25	2,92	2,06	8,55	4,28	3,03	32,99
IV	55,35	55,61	55,05	0,39	0,28	0,15	0,71	0,50	197,61

Примечание: M – среднее арифметическое значение; M_{max}, M_{min} – максимальное и минимальное значения соответственно; σ – стандартное отклонение; ±m – ошибка среднего; σ² – дисперсия; V – коэффициент вариации; P – точность опыта. * Достоверность среднего значения при t_{0,5} = 2,4.

Статистический анализ выявил закономерности в изменчивости показателей. В усредненных выборках, сгруппированных по условиям произрастания, отмечается незначительная вариативность показателя в удовлетворительных, на-

пряженных и критических условиях произрастания. Для конфликтных условий зафиксирован наибольший коэффициент вариации – от 3 до 9 раз выше, чем для других условий произрастания. Высокая степень разброса значений также наблюдается на объектах с конфликтными условиями фитосреды. Наименьшая вариативность характерна для питомника, где большая часть растений – здоровые.

В критических условиях отмечена тенденция к уменьшению изменчивости признаков, что сопровождается значительным угнетением жизнеспособности растений, увеличением доли ослабленных и усыхающих особей. Диапазон между минимальными и максимальными показателями наиболее широк в выборках, представляющих конфликтные условия среды – до 17 %, для критических условий этот размах минимален. Для определения воздействия условий среды на устойчивость изучаемых кустарниковых растений выполнен дисперсионный анализ (табл. 3).

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа влияния условий произрастания на жизненное состояние кустарников на объектах озеленения г. Красноярск
Results of the analysis of variance concerning the influence of growing conditions on the vitality status of shrubs at the Krasnoyarsk’s landscaping facilities

Тип условий произрастания	Вид	Критерий Фишера			Досто- верность
		расчетный	табличный		
			P = 0,05	P = 0,01	
I–IV	Сирень венгерская	206,93	4,1	7,6	+
II–III		228,64	34,1	7,7	+
III–IV		36,22	34,1	7,7	+
I, III, IV	Смородина двуиглая	999,96	4,8	9,8	+
III–IV		11,54	34,1	7,7	–
I, III, IV	Карагана древовидная	225,73	4,8	9,8	+
III–IV		4,62	34,1	7,7	–
I, III, IV	Кизильник блестящий	4996,76	4,8	9,8	+
III–IV		456,60	34,1	7,7	+
I–IV	Жимолость татарская	611,44	4,1	7,6	+
II–III		374,80	4,8	9,8	+
III–IV		113,14	34,1	7,7	+

Примечание: «+» – достоверно; «–» – недостоверно.

Результаты анализа ИЖС исследуемых видов кустарников позволили выявить видовые особенности:

– в критических условиях наименьшее снижение ИЖС относительно состояния растений в питомнике установлено у сирени венгерской – 31,5 % и смородины двуиглой – 31,7 %, что говорит об их повышенной устойчивости к условиям городской среды;

– максимальное снижение ИЖС в критических условиях произрастания наблюдается у жимолости татарской – 42 %;

– жимолость татарская и сирень венгерская одинаково реагируют на слабые антропогенные нагрузки – в напряженных условиях фитосреды нет достоверных различий по уровню снижения ИЖС – 13,76 и 14,02 %, соответственно;

– в конфликтных условиях фитосреды наименьшее снижение ИЖС отмечается у кизильника блестящего и смородины двуиглой.

Исследования показали, что кустарниковые растения, выращиваемые в питомнике, демонстрируют более высокую жизнеспособность по сравнению с видами в условиях городского озеленения. Данный факт объясняется как местоположением питомника в экологически чистой пригородной зоне, без рекреационных нагрузок, так и разницей в технологиях выращивания и ухода за кустарниками. В питомнике применяются методики, обеспечивающие оптимальное развитие растений, в то время как на городских озелененных территориях уход за растениями менее интенсивен. Вместе с тем реакция различных видов кустарников на условия произрастания неодинакова, что свидетельствует о видовых особенностях растений (табл. 4).

Таблица 4

**Снижение ИЖС кустарников, %, на объектах озеленения г. Красноярска
относительно данного показателя у растений в питомнике
Decrease in the shrub VI, %, at the Krasnoyarsk's landscaping facilities compared
to this parameter for the plant species growing in the nursery**

Тип условий произрастания	Сирень венгерская	Смородина двуиглая	Карагана древовидная	Кизильник блестящий	Жимолость татарская
II	13,76	—	—	—	14,02
III	23,97	21,05	22,78	20,75	31,01
IV	31,50	31,72	35,61	38,11	44,11

В результате анализа устойчивости кустарниковых видов на городских объектах озеленения с различным уровнем антропогенных нагрузок установлено:

в напряженных условиях сирень венгерская (86,24) и жимолость татарская (85,98) незначительно различаются по снижению ИЖС;

в конфликтных условиях виды располагаются в следующем порядке по убыванию ИЖС: кизильник блестящий и смородина двуиглая (78,95) – карагана древовидная (77,22) – сирень венгерская (76,03) – жимолость татарская (68,99);

в критических условиях наблюдается такая последовательность снижения ИЖС: сирень венгерская (68,5) и смородина двуиглая (68,28) – карагана древовидная (64,39) – кизильник блестящий (61,89) – жимолость татарская (55,89).

Таким образом, жизненное состояние растений является параметром, отражающим степень воздействия внешних факторов. В связи с этим для территорий озеленения с различным уровнем антропогенного воздействия целесообразно подбирать виды растений, обладающие адекватной устойчивостью к сложившимся условиям среды.

ИЖС кустарников г. Красноярска в зависимости от типа объекта озеленения представлены в табл. 5.

Таблица 5

**ИЖС кустарников г. Красноярска в зависимости от типа объекта озеленения
The shrub VI of Krasnoyarsk depending on the type of the landscaping facility**

Тип объекта озеленения	Сирень венгерская	Смородина двуиглая	Карагана дре- вовидная	Кизильник блестящий	Жимолость татарская
Сквер	78,21	75,34	75,33	79,10	68,75
Парк	77,20	—	77,85	78,25	70,45
Насаждения улиц	71,89	70,91	69,33	70,06	60,52

На основе анализа ИЖС установлено, что кустарники демонстрируют разную жизнеспособность в зависимости от типа объекта озеленения: наиболее высокие ИЖС зафиксированы в парках, затем в скверах, и наименьшие – вдоль улиц и проспектов.

Для определения статистической значимости влияния типа объекта озеленения на состояние кустарниковых насаждений был выполнен дисперсионный анализ (табл. 6).

Таблица 6

Результаты дисперсионного анализа влияния типа объекта озеленения на жизненное состояние кустарников г. Красноярск
Results of the analysis of variance concerning the influence of the type of a landscaping facility on the vitality status of shrubs

Тип объекта озеленения	Вид	Расчетный критерий Фишера	Достоверность
Сквер, парк	Сирень венгерская	0,07	–
Парк, улица		0,63	–
Сквер, улица		1,04	–
	Смородина двуиглая	4,36	–
Сквер, парк	Карагана древовидная	0,16	–
Парк, улица		7,22	+
Сквер, улица		2,34	–
Сквер, парк	Кизильник блестящий	0,02	–
Парк, улица		10,37	+
Сквер, улица		10,07	+
Сквер, парк	Жимолость татарская	0,14	–
Парк, улица		7,98	+
Сквер, улица		7,54	+

Примечание: Табличное значение критерия Фишера при $P = 0,05$ и $t_{\text{табл.}} = 7,7$. «+» – достоверно; «–» – недостоверно.

Анализ данных табл. 6 показал:
отсутствие статистически значимых различий ИЖС кустарников, произрастающих в скверах и парках;
статистически значимые различия ИЖС для кизильника блестящего и жимолости татарской в скверах и на улицах, для других исследуемых видов на объектах озеленения этих типов существенных различий не установлено;
статистически значимые различия ИЖС для караганы древовидной, кизильника блестящего и жимолости татарской в парках и на улицах, что указывает на более значимое влияние среды на жизненное состояние этих видов по сравнению с условиями в парках.

Заключение

Настоящее исследование позволяет заключить, что индекс жизненного состояния выступает индикатором степени влияния экологических факторов на состояние кустарниковых насаждений. Жизненное состояние проанализированных растений оценивается от здорового до отмирающего. Индекс жизненного состояния варьирует от 99 до 15, закономерно снижаясь в

критических условиях произрастания. На основании сравнительного анализа построен биоиндикационный ряд исследуемых видов кустарников по степени чувствительности (от наиболее устойчивого к менее жизнеспособному) к техногенным нагрузкам урбосреды: сирень венгерская – смородина двуиглая – кизильник блестящий – карагана древовидная – жимолость татарская. Различные категории объектов озеленения по мере снижения их благоприятного воздействия на жизненное состояние кустарников располагаются в следующей последовательности: парковые зоны – скверы – улицы – магистрали (проспекты).

Результаты исследования устойчивости кустарников позволяют дифференцировать виды растений для использования на различных типах объектов озеленения с учетом уровня антропогенного воздействия: сирень венгерская и смородина двуиглая рекомендуются для посадки как в парках, так и вдоль магистралей с интенсивным движением; кизильник блестящий, карагана древовидная – в парках и скверах; жимолость татарская – в парках и на объектах с низким уровнем антропогенных нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авдеева Е.В. Рост и индикаторная роль древесных растений в урбанизированной среде: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2007. 361 с.

Avdeeva E.V. *Growth and Indicator Role of Woody Plants in Urban Environments: A Monograph*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2007. 361 p. (In Russ.).

2. Авдеева Е.В., Иванов Д.В., Шпагин Д.Е. Инвентаризационная оценка насаждений объектов озеленения и городского питомника (на примере г. Красноярска) // Хвойные бореал. зоны. 2024. Т. 42, № 2. С. 53–62.

Avdeeva E.V., Ivanov D.V., Shpagin D.E. Inventory Assessment of Plantings of Greening Objects and City Nursery (Based on the Example of Krasnoyarsk). *Conifers of the boreal area*, 2024, vol. 42, no. 2, pp. 53–62. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-53-62>

3. Авдеева Е.В., Кухар И.В., Иванов Д.В. Инвентаризационная оценка объектов озеленения города Красноярска // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. 40, № 4. С. 242–249.

Avdeeva E.V., Kukhar I.V., Ivanov D.V. Inventory Assessment of Landscaping Objects in the City of Krasnoyarsk. *Conifers of the boreal area*, 2022, vol. 40, no. 4, pp. 242–249. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-6-242-249>

4. Авдеева Е.В., Панов А.И. Биоиндикация урбоэкосистем по морфологическим признакам хвойных растений // Хвойные бореал. зоны. 2017. Т. XXXV, № 1-2. С. 7–14.

Avdeeva E.V., Panov A.I. Bioindication of Urban Ecosystems According to the Morphological Characteristics of Conifers. *Conifers of the boreal area*, 2017, vol. 35, no. 1-2, pp. 7–14. (In Russ.).

5. Алексеев В.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с.

Alekseev V.A. *Forest Ecosystems and Air Pollution*. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p. (In Russ.).

6. Ларионов М.В., Любимов В.Б., Логачева Е.А., Сергадеева М.Ю. Влияние сернистого газа на декоративные кустарники (на примере урбанизированных территорий в сельской местности Балашовского муниципального района) // Фундаментальн. исследования. 2015. № 7-1. С. 35–38.

Larionov M.V., Lyubimov V.B., Logacheva E.A., Sergadeeva M.Y. The Influence of Sulfur Dioxide on Ornamental Shrubs (For Example, Urbanized Areas and Rural Areas Balashov Municipal District). *Fundamental research*, 2015, no. 7-1, pp. 35–38. (In Russ.).

7. Мозолева Е.Г. Причины ослабления и гибели молодых посадок в Москве и меры по повышению их устойчивости и жизнеспособности // Экология большого города. 2001. № 5. С. 40–46.

Mozolevskaya E.G. Causes of the Weakening and Death of Young Trees in Moscow and Measures to Enhance Their Stability and Viability. *Ecology of Big City*, 2001, no. 5, pp. 40–46. (In Russ.).

8. Мозолева Е.Г., Жеребцова Г.П., Соколова Э.С. и др. Оценка жизнеспособности деревьев и правила их отбора и назначения к вырубке и пересадке. М.: МГУЛ, 2004. 40 с.

Mozolevskaya E.G., Zherebtsova G.P., Sokolova E.S., et al. *Assessment of Tree Viability and Guidelines for Their Selection and Designation for Felling and Replanting*. Moscow, MGUL Publ., 2004. 40 p. (In Russ.).

9. Неверова О.А. Основные пути изменения жизнедеятельности древесных растений в условиях промышленного города Кемерово // Экология промышлен. производства. 2001. № 4. С. 10–14.

Neverova O.A. The Main Pathways of Change in the Vital Activity of Woody Plants in the Industrial City of Kemerovo. *Ėkologiâ promyshlennogo proizvodstva* = Industrial ecology, 2001, no. 4, pp. 10–14. (In Russ.).

10. Неверова О.А. Биоэкологическая оценка атмосферного воздуха по состоянию древесных растений. Новосибирск: Наука, 2001. 119 с.

Neverova O.A. *Bioecological Assessment of Atmospheric Air Based on the Health Status of Woody Plants*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001. 119 p. (In Russ.).

11. Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск: Наука, 2003. 222 с.

Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. *Woody Plants and the Urbanized Environment: Ecological and Biotechnological Aspects*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 222 p. (In Russ.).

12. Николаевский В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 278 с.

Nikolaevskiy V.S. *Biological Foundations of Plants' Gas Tolerance*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 278 p. (In Russ.).

13. Примаков Н.В. Перспективность применения древесно-кустарниковых растений в озеленении города Краснодар // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 98–109.

Primakov N.V. Prospects for Woody and Shrubby Plants in the Landscaping of Krasnodar. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 1, pp. 98–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-98-109>

14. Селенина Е.А., Авдеева Е.В., Селенин Н.А., Вагнер Е.А. Рекомендации по формированию правил озеленения и элементов благоустройства современного муниципального образования // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2020. С. 10–14.

Selenina E.A., Avdeeva E.V., Selenin N.A., Vagner E.A. Recommendations for Greening Rules and Improvements of a Modern Municipal District. *Technologies and Equipment for Garden, Park and Landscape Construction: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, 2020, pp. 10–14. (In Russ.).

15. Якубов Х.Г. Экологический мониторинг зеленых насаждений в Москве. М.: Стагирит-Н, 2005. 264 с.

Yakubov Kh.G. *Environmental Monitoring of Green Spaces in Moscow*. Moscow, Stagirit-N Publ., 2005. 264 p. (In Russ.).

16. Chen D., Wang X., Thatcher M., Barnett G., Kachenko A., Prince R. Urban Vegetation for Reducing Heat Related Mortality. *Environmental Pollution*, 2014, vol. 192, pp. 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.002>

17. Chen Y., Zhong Q., Li B. Positive or Negative Viewpoint Determines the Overall Scenic Beauty of a Scene: A Landscape Perception Evaluation Based on a Panoramic View. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 14, art. 11458. <https://doi.org/10.3390/su151411458>

18. Li J., Huang Z., Zhu Z., Ding G. Coexistence Perspectives: Exploring the Impact of Landscape Features on Aesthetic and Recreational Values in Urban Parks. *Ecological Indicators*, 2024, vol. 162, art. 112043. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112043>

19. Li X., Huang C. Environment Impact of Heavy Metals on Urban Soil in the Vicinity of Industrial Area of Baoji City, P.R. China. *Environmental Geology*, 2007, vol. 52, iss. 8, pp. 1631–1637. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0608-3>

20. Lisotova E., Suntsova L., Insakov E. State of Woody Vegetation in an Urbanized Environment (The Example of Krasnoyarsk). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, art. 012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012080>

21. Ozkan U.Y., Ozdemir I. Assessment of Landscape Silhouette Value in Urban Forests Based on Structural Diversity Indices. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 12, pp. 3971–3980. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0826-x>

22. Tiwary A., Reff A., Colls J.J. Collection of Ambient Particulate Matter by Porous Vegetation Barriers: Sampling and Characterization Methods. *Journal of Aerosol Science*, 2008, vol. 39, no. 1, pp. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.09.011>

23. Weber F., Kowarik I., Säumel I. Herbaceous Plants as Filters: Immobilization of Particulates Along Urban Street Corridors. *Environmental pollution*, 2014, vol. 186, pp. 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.12.011>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Краткое сообщение

УДК 630*181.351

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-175-182

Световой режим под пологом березняка черничного

А.Н. Соболев¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

П.А. Феклистов²✉, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

В.И. Мелехов³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

И.Н. Болотов², д-р биол. наук, чл.-корр. РАН; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

О.С. Барзут³, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AFN-5294-2022](https://orcid.org/0000-0002-0338-9715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-9715>

¹Соловецкий музей заповедник, пос. Соловецкий, Приморский р-н, Архангельская обл., Россия, 164070; alex-sobol@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 109, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru✉, dirnauka@fciactic.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; v.melekhov@narfu.ru, o.barzut@narfu.ru

Поступила в редакцию 25.03.25 / Одобрена после рецензирования 19.06.25 / Принята к печати 23.06.25

Аннотация. Исследование проводили на Большом Соловецком острове в Белом море. Изучали освещенность в типичном для острова березняке черничном с большой площадью выдела. Состав древостоя – 7БЗЕ, с равной средней высотой березы и ели. Полог образован в основном березой с вкраплениями ели, полнота средняя, бонитет V – типичный для Большого Соловецкого острова. Для анализа светового режима под пологом древостоя было подобрано 20 учетных деревьев березы и 20 деревьев ели, под кронами которых производили измерение освещенности с помощью люксметра «ТКА-Люкс» в 5–10-кратной повторностях в разных частях подкронового пространства. Учеты осуществляли 12 и 14 августа с 10 до 13 ч в разные по погодным условиям (облачности) дни: в ясный и в пасмурный, а также в разных направлениях, с северной стороны и с южной. Освещенность на открытом месте вблизи изучаемого березняка черничного составила в ясную солнечную погоду 66 000 лк, а в пасмурную – 22 000 лк. Освещенность под пологом леса в просветах между деревьями в ясную погоду оказалась в 2 раза ниже открытого места, а в пасмурную – в 3 раза. В ясную погоду освещенность под пологом березняков в среднем равнялась 10 500 тыс. лк, а под елями – 4300 лк, в пасмурную погоду – соответственно 4000 и 1500 лк. В ясную погоду различия для северной и южной сторон существенны и достоверны и под пологом березы, и под пологом ели. В пасмурную погоду различия нивелируются и недостоверны. В целом ель задерживает свет в 2 раза сильнее, чем береза.

Ключевые слова: освещенность, световой режим древостоя, полог леса, освещенность под пологом леса, породный состав, березняк черничный, береза, ель, Большой Соловецкий остров



Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаврёрова УрО РАН (№ госрегистрации – 124103100030-1).

Для цитирования: Соболев А.Н., Феклистов П.А., Мелехов В.И., Болотов И.Н., Барзут О.С. Световой режим под пологом березняка черничного // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 175–182. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-175-182>

Brief report

Light Regime Under the Canopy of a Birch-Blueberry Forest

*Aleksandr N. Sobolev*¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

*Pavel A. Feklistov*²✉, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

*Vladimir I. Melekhov*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

*Ivan N. Bolotov*², Doctor of Biology, Corresponding Member of RAS;

ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

*Oksana S. Barzut*³, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AFN-5294-2022](https://orcid.org/0000-0002-0338-9715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-9715>

¹Solovetsky State Historical, Architectural and Natural Museum-Reserve, pos. Solovetsky, Primorskiy District, Arkhangelsk Region, Russia, 164070; alex-sobol@mail.ru

²N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, Russia, 163000; pfeklistov@yandex.ru✉, dirnauka@fciactic.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002; v.melekhov@narfu.ru, o.barzut@narfu.ru

Received on March 25, 2025 / Approved after reviewing on June 19, 2025 / Accepted on June 23, 2025

Abstract. The research was carried out on Bolshoy Solovetsky Island in the White Sea. Illumination was studied in a birch-blueberry forest with a fairly large allotment area. The forest is typical for the island. Stand composition: 7B3S; with equal average heights for birch and spruce. The canopy consists mainly of birch with occasional spruce; it is moderately dense and has the V quality class, which is typical for the Bolshoy Solovetsky Island. We selected 20 reference birch trees and 20 spruce trees to analyze the light conditions under the forest canopy. The light intensity was measured under their crowns using a TKA-Lux luxmeter, with 5–10 repetitions in different parts of the sub-crown space. The measurements were taken on August 12 and 14 from 10 a.m. to 1 p.m. on days with varying weather conditions (cloud cover), both clear and cloudy, as well as in different directions, from the north and from the south. Illumination in an open area near the studied birch-blueberry forest was 66,000 lux on a clear, sunny day and 22,000 lux on a cloudy day. Illumination under the forest canopy through the breaks in the trees was found to be half that of an open area on a clear day, and one-third on a cloudy day. On clear days, the average illumination under the canopy of birch trees was 10,500 lux, and under spruce trees, 4,300 lux; on cloudy days, these figures were 4,000 and 1,500 lux, respectively. On clear days, the differences between the north and south

sides are significant and statistically significant, both under birch canopies and under spruce canopies. On cloudy days, these differences are minimized and unreliable. Overall, spruce blocks light twice as effectively as birch.

Keywords: illumination, forest stand light regime, forest canopy, light conditions beneath the forest canopy, tree species composition, birch-blueberry forest, birch, spruce, Bolshoy Solovetsky Island

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (State registration No. 124103100030-1).

For citation: Sobolev A.N., Feklistov P.A., Melekhov V.I., Bolotov I.N., Barzut O.S. Light Regime Under the Canopy of a Birch-Blueberry Forest. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 175–182. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-175-182>

Введение

Жизнедеятельность растений, в т. ч. древесных видов, во многом зависит от освещения. Солнечный свет – это не просто источник энергии для фотосинтеза: он влияет на образование хлорофилла, определяет направление роста (фототропизм) и регулирует периодичность ключевых биологических процессов [3, 4, 6, 8]. Эти аспекты подробно изучены и отражены в учебной литературе [7]. Особое значение световой режим приобретает в рамках растительных сообществ, где он становится одним из определяющих факторов существования леса. Этот вопрос традиционно рассматривается в фундаментальных работах по лесоведению [12]. Вместе с тем, как подчеркивал И.С. Мелехов [11], в научной литературе встречаются противоречивые данные об освещенности под пологом леса.

Подобные исследования зачастую ограничены конкретными регионами [1, 23, 24] либо посвящены специфике северотаежных лесов [14]. Это создает пробелы в понимании общих закономерностей освещенности. В то же время изучение процессов в лесных экосистемах необходимо для сохранения ключевых видов и поддержания их представленности в растительных сообществах [18]. Освещенность под пологом леса значительно влияет на все ярусы фитоценоза, виды травянистой растительности, урожайность ягодных растений, подрост, подлесок и древостой [5, 9, 10, 16]. О важности изучения проникновения света под полог леса говорят и публикации, отражающие моделирование этих процессов [19, 21, 22, 25]. Тем не менее, многие аспекты данной темы остаются малоизученными. Это обусловлено неодинаковостью географического расположения растительных сообществ; разнообразием фитоценозов; различным сочетанием древесных пород в составе насаждений; возрастными особенностями древостоев; погодными условиями.

Световой режим играет ключевую роль в естественном возобновлении леса под пологом древостоя. Он напрямую влияет на появление и развитие подроста разных пород, а в долгосрочной перспективе определяет характер сукцессий, т. е. предопределяет смену древесных пород [2, 13, 17]. Типичным примером такого древостоя служит березняк черничный. Он характерен не только для Соловецких островов, но и для таежной зоны в целом. На больших площадях, пройденных рубками, восстановление леса чаще всего начинается именно с березы.

Цель исследования – изучить освещенность под кронами деревьев и в окнах в сравнении с освещенностью открытого места при разных погодных условиях.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступил березняк черничный. Он занимает обширную для Соловецкого острова площадь порядка 3–4 га. Состав древостоя – 7БЗЕ, при этом береза и ель имеют равную среднюю высоту. Полог сформирован преимущественно березой с отдельными вкраплениями ели. Отмечена средняя полнота насаждения и низкий бонитет, что типично для северных условий (табл. 1).

Таблица 1

Таксационная характеристика березняка черничного
Inventory characteristics of the birch-blueberry forest

Порода	Среднее		Полнота	Возраст, лет	Бонитет	Запас, м³/га
	диаметр, см	высота, м				
Береза	12	11	0,6	80	V	93
Ель	16	11	0,1	100		40

Для исследования светового режима под пологом березняка было отобрано 20 берез и 20 елей. Под кронами каждого из этих деревьев выполняли измерения освещенности с помощью люксметра «ТКА Люкс», а также в проветах между деревьями. Учеты проводили в 5–10-кратных повторностях в разных частях подкронового пространства. Такая методика широко применяется в эколого-физиологических исследованиях, в т. ч. за рубежом [20, 23, 26, 27]. Измерения осуществляли 12 и 14 августа с 10:00 до 13:00 в дни с разным уровнем облачности: 12.08 – ясный день; 14.08 – пасмурный день. Дополнительно замеры выполняли с разных сторон относительно ствола: с северной и южной и в окнах между деревьями. В результате было выполнено более 1200 измерений освещенности.

Результаты исследования и их обсуждение

Ключевым параметром для оценки светового режима под пологом леса служит освещенность на открытом пространстве. Полог древостоя действует как фильтр, пропуская лишь часть солнечного излучения. Предварительные замеры на открытом участке перед началом работ под пологом показали следующие значения: в ясную погоду – 66 000 лк; в пасмурную – 22 000 лк (табл. 2).

Таблица 2

Статистические показатели освещенности на открытом месте вблизи березняка черничного
Statistical indicators of illumination (lux) in an open area near the birch-blueberry forest

Погодные условия	М, лк	σ, лк	±m, лк	V, %	P, %	t
Ясное небо	66 567	3807	983	5,71	1,47	67,7
Пасмурно	22 253	6558	1693	29,47	7,60	13,1

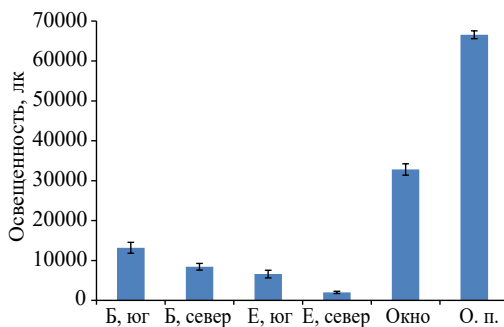
Примечание: М – среднее значение; σ – стандартное отклонение; ±m – ошибка среднего; V – коэффициент вариации; P – точность опыта; t – достоверность, критерий Стьюдента.

Все полученные данные статистически достоверны при уровне значимости 0,05 и характеризуются высокой точностью измерений. Важный вывод касается изменчивости освещенности: в пасмурную погоду ее колебания на открытом пространстве почти в 6 раз превышают аналогичные показатели в ясную погоду. Это подчеркивает влияние облачности на стабильность светового режима и должно учитываться при анализе условий под пологом леса.

Исследование освещенности в ясную солнечную погоду показало, что световой режим под пологом леса существенно отличается от условий на открытом пространстве. Освещенность в просветах между деревьями в 2 раза ниже, чем на открытом участке (рис. 1). Это демонстрирует фильтрующую роль древостоя даже в зонах с минимальной затененностью.

Рис. 1. Освещенность с разных сторон деревьев березы, ели и в окнах в сравнении с открытым пространством (О.п.) в солнечную погоду

Fig. 1. Illumination from different sides of birch and spruce trees and through the breaks in the trees compared to the open space (O.p.) on a sunny day



Освещенность под пологом березы с южной стороны в солнечный день составляет около 13 000 лк; с северной – примерно 8000 лк. Различие достоверно. Под пологом ели с южной стороны зафиксирована освещенность 6500 лк; с северной – 2000 лк. Различие также достоверно. Эти данные свидетельствуют о том, что ель задерживает солнечный свет в 2 и более раз сильнее, чем береза. Более плотная крона ели создает в превосходящей степени выраженное затенение, особенно с северной стороны.

В пасмурную погоду, когда небо затянуто облаками, общие закономерности распределения освещенности сохраняются, но с рядом существенных отличий (рис. 2). Освещенность в просветах между деревьями почти в 3 раза ниже, чем на открытом пространстве. Это демонстрирует более выраженное рассеивание света облачным покровом и его фильтрацию пологом леса. Под пологом березы освещенность составляет около 4000 лк. При этом различия по сторонам света (север/юг) статистически недостоверны, вероятно, из-за равномерного рассеянного освещения при облачности. Под пологом ели уровень освещенности еще ниже – 1200–1700 лк. Различия между северной и южной сторонами также недостоверны.

Таким образом, реальная освещенность в разные дни (в зависимости от состояния облачности) будет варьироваться для ясной и пасмурной погоды, оставаясь достаточно высокой лишь в просветах между деревьями.

Освещенность под пологом леса критический фактор для произрастания и развития подростa. На момент проведения исследования под пологом березняка черничного зафиксировано около 500 шт./га елового подростa. При этом более светолюбивые виды – сосна и береза – в составе подростa отсутствуют. Это можно объяснить недостаточной освещенностью. Как показали измерения, в пасмурную погоду освещенность под пологом часто опускается ниже

3000 лк – критического уровня для существования подроста сосны (по данным А.В. Веретенникова [4]). Ель же более теневынослива, что позволяет ее подросту успешно развиваться в условиях умеренного затенения. Кроме того, согласно исследованиям Г.Ф. Хильми [15], ель менее чувствительна к толщине подстилки, чем сосна, что также способствует ее успешному возобновлению наряду с низкой освещенностью подпологового пространства.

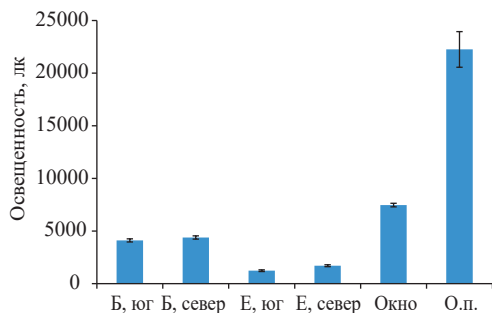


Рис. 2. Освещенность с разных сторон деревьев березы, ели и в окнах в сравнении с открытым пространством в пасмурную погоду

Fig. 2. Illumination from different sides of birch and spruce trees and through the breaks in the trees compared to the open space in a cloudy day

Выводы

Кроны деревьев и полог в целом рассеивают и фильтруют солнечный свет, существенно ослабляя его показатели в приземном пространстве по сравнению с открытым местом. Особенно сильно это проявляется в солнечную погоду и под кронами деревьев:

1. Освещенность на открытом месте в условиях Соловков в ясную погоду почти в 3 раза выше, чем в пасмурную – 22 000 и 66 000 лк соответственно.

2. Освещенность под пологом леса в просветах между деревьями в окнах в ясную погоду в 2 раза ниже открытого места, а в пасмурную – в 3 раза.

3. В ясную погоду освещенность под кронами деревьев березы и ели выше с южной стороны, а в пасмурную различия недостоверны.

4. В ясную погоду освещенность под березами в среднем составляет 10 500 лк, а под елями – 4300 лк, в пасмурную погоду – 4000 и 1500 лк соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев В.А. Световой режим леса. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1975. 227 с. Alekseev V.A. *Light Regime in a Forest*. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 227 p. (In Russ.).
2. Братилова Н.П., Лузганов А.Г., Свалова А.И., Власов Д.А. Влияние освещенности на рост потомств сосны кедровой сибирской разного географического происхождения // Лесн. таксация и лесоустройство. 2013. № 2(50). С. 78–80. Bratilova N.P., Luzganov A.G., Svalova A.I., Vlasov D.A. The Influence of Illumination on the Growth of Breeds of a Siberian Cedar Pine of Different Geographical Origin. *Forest inventory and forest planning*, 2013, no. 2(50), pp. 78–80. (In Russ.).
3. Вальтер Г. Растительность земного шара. Эколого-физиологическая характеристика. Т. 2. Леса умеренной зоны. М.: Прогресс, 1974. 423 с. Walter G. *Vegetation of the Globe. Ecological and Physiological Characteristics*. Vol. 2. Forests of the Temperate Zone. Moscow, Progress Publ., 1974. 423 p. (In Russ.).
4. Веретенников А.В. Физиология растений с основами биохимии. Воронеж: Воронеж. ун-т, 1987. 256 с. Veretennikov A.V. *Plant Physiology with the Basics of Biochemistry*. Voronezh, VGU Publ., 1987. 256 p. (In Russ.).

5. Зубкова Е.В., Фролов П.В., Быховец С.С., Шанин В.Н. Комплексное исследование напочвенного покрова леса с учетом факторов влажности почв и освещенности под пологом // Заповедники – 2019: биологическое и ландшафтное разнообразие, охрана и управление: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 231–234.

Zubkova E.V., Frolov P.V., Bykhovets S.S., Shanin V.N. The Comprehensive Study of Ground Cover of the Forest, Taking into Account the Factors of Soil Moisture and Light Under the Canopy. *The Nature Reserves – 2019. Biological and Landscape Diversity, Conservation and Management. The abstracts of the 9th Pan-Russian Scientific-Practical Conference.* 2019, pp. 231–234. (In Russ.).

6. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 464 с.

Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Physiology of Woody Plants.* Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 464 p. (In Russ.).

7. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высш. шк.; Абрис, 2011. 783 с.

Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Plant Physiology.* Moscow, Vysshaya Skola, Abris Publ., 2011. 783 p. (In Russ.).

8. Лур Х., Польстер Г., Фидлер Г. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 423 с.

Lear Kh., Polster G., Fiedler G. *Physiology of Woody Plants.* Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 423 p. (In Russ.).

9. Малиновских А.А. Влияние уровня освещенности под пологом леса на урожайность брусники в условиях Средне-Обского бора Алтайского края // Вестн. Алтайск. гос. аграрн. ун-та. 2016. № 4(138). С. 105–109.

Malinovskikh A.A. The Effect of Illumination Level Under Forest Canopy on Cowberry Yield Under the Conditions of the Sredne-Obskoy Pine Forest of the Altai Region. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2016, no. 4(138), pp. 105–109. (In Russ.).

10. Малиновских А.А. Влияние уровня освещенности под пологом леса на урожайность черники в условиях средне-обского бора алтайского края // Вестн. Алтайск. гос. аграрн. ун-та. 2017. № 6(152). С. 87–92.

Malinovskikh A.A. The Effect of Illumination Level Under Forest Canopy on European Blueberry Yield Under the Conditions of the Sredne-Obskoy Pine Forest of the Altai Region. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2017, no. 6(152), pp. 87–92. (In Russ.).

11. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.

Melekhov I.S. *Forest Science.* Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).

12. Основы лесной биогеоценологии / АН СССР. Ботан. ин-т и Лаборатория лесоведения. Под ред. акад. В.Н. Сукачева и д-ра биол. наук Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1964. 574 с.

Fundamentals of Forest Biogeocenology. Ed. by Academician V.N. Sukachev and Doctor of Biology N.V. Dylis. Moscow, Nauka Publ., 1964. 574 p. (In Russ.).

13. Панов А.Н. Влияние освещенности на подрост кедр сибирского в различных типах леса // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 11. С. 973–975.

Panov A.N. Influence of Light Conditions Indifferent Forest Types on *Pinus sibirica* Seedling. *Optika atmosfery i okeana* = Atmospheric and Oceanic Optics, 2006, vol. 19, no. 11, pp. 973–975. (In Russ.).

14. Феклистов П.А., Соболев А.Н. Световой режим в древостоях разного породного состава на Соловецких островах // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2013. № 3. С. 93–100.

Feklistov P.A., Sobolev A.N. Light Conditions in Stands of Different Species Composition on the Solovetsky Islands. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Humanitarian and Social Sciences"*, 2013, no. 3, pp. 93–100. (In Russ.).

15. Хильми Г.Ф. Теоретическая биогеофизика леса / АН СССР. Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: АН СССР, 1957. 206 с.

Hilmi G.F. *Theoretical Biogeophysics of Forests*. Moscow, AN SSSR Publ., 1957. 206 p. (In Russ.).

16. Шарый П.А., Шарая Л.С., Сидякина Л.В., Саксонов С.В. Влияние солнечной энергии и сомкнутости крон деревьев на богатство видов травянистой растительности юга лесостепи // Сиб. экол. журн. 2017. Т. 24, № 5. С. 539–552.

Shary P.A., Sharaya L.S., Sidiyakina L.V., Saksonov S.V. Influence of Solar Energy and Tree Crown Closure on Species Richness of Herbage in the South of Forest-Steppe. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2017, vol. 24, no. 5, pp. 539–552. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SEJ20170502>

17. Яковлев А.А., Виноградова Е.А., Ануфриев М.В., Крылов И.А., Брагин В.Д. Влияние освещенности под пологом древостоя на проективное покрытие живого напочвенного покрова и численность подроста // Актуальные вопросы лесного хозяйства: материалы VI Междунар. молодежн. науч.-практ. конф. СПб.: Реноме, 2022. С. 186–189.

Yakovlev A.A., Vinogradova E.A., Anufriev M.V., Krylov I.A., Bragin V.D. Influence of the Light Under the Canopy on the Propagation Cover of the Living Ground Cover and the Number of Undergrowth. *The Actual Issues in Forestry: International Youth Scientific-Practical Conference*. Saint Petersburg, 2022, pp. 186–189. (In Russ.).

18. Bormann F.H., Likens G.E. *Pattern and Processes in a Forested Ecosystem*. New York, Springer, 1979. 253 p.

19. Gueymard C.A. REST2: High-Performance Solar Radiation Model for Cloudless-Sky Irradiance, Illuminance, and Photosynthetically Active Radiation – Validation with a Benchmark Dataset. *Solar Energy*, 2008, vol. 82, iss. 3, pp. 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.008>

20. Jones H.G., Archer N., Rotenberg E., Casa R. Radiation Measurement for Plant Ecophysiology. *Journal of Experimental Botany*, 2003, vol. 54, iss. 384, pp. 879–889. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg116>

21. Kobayashi H., Baldocchi D.D., Ryu Y., Chen Q., Ma S., Osuna J.L., Ustin S.L. Modeling Energy and Carbon Fluxes in a Heterogeneous Oak Woodland: A Three-Dimensional Approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, vol. 152, pp. 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.008>

22. Lee H., Slatton K.C., Roth B.E., Cropper W.P. Prediction of Forest Canopy Light Interception Using Three-Dimensional Airborne LiDAR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, vol. 30, pp. 189–207. <https://doi.org/10.1080/01431160802261171>

23. Musselman K.N., Margulis S.A., Molotch N.P. Estimation of Solar Direct Beam Transmittance of Conifer Canopies from Airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 2013, vol. 136, pp. 402–415. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.021>

24. Promis Á. Measuring and Estimating the Below-Canopy Light Environment in a Forest: A Review. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2013, vol. XIX, iss. 1, pp. 139–146. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.02.014>

25. Promis A., Schindler D., Reif A., Cruz G. Solar Radiation Transmission in and Around Canopy Gaps in an Uneven-Aged *Nothofagus betuloides* Forest. *International Journal of Biometeorology*, 2009, vol. 53, pp. 355–367. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0222-7>

26. Seidel D., Fleck S., Leuschner C. Analyzing Forest Canopies with Ground-Based Laser Scanning: A Comparison with Hemispherical Photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, vol. 154–155, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.006>

27. Yamamoto K., Murase Y., Etou C., Shibuya K. Estimation of Relative Illuminance Within Forests Using Small-Footprint Airborne LiDAR. *Journal of Forest Research*, 2015, vol. 20, iss. 3, pp. 321–327. <https://doi.org/10.1007/s10310-015-0484-3>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare 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

Краткое сообщение

УДК 630*182:571.51

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-183-193

Динамика структуры травяно-кустарничкового яруса березовых насаждений Красноярской лесостепи

И.А. Гончарова^{1,2✉}, канд. биол. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAF-6890-2019](https://orcid.org/0000-0002-3495-9979),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-9979>

Л.Н. Скрипальщикова¹, канд. биол. наук, доц., ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

А.П. Барченков¹, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, обособленное подразделение Красноярского научного центра СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; iagoncharova007@mail.ru✉, lara@ksc.krasn.ru, alexbarchenkov@mail.ru

²Красноярский краевой краеведческий музей, ул. Дубровинского, д. 84, г. Красноярск, Россия, 660049; iagoncharova007@mail.ru✉

Поступила в редакцию 19.03.25 / Одобрена после рецензирования 10.06.25 / Принята к печати 13.06.25

Аннотация. Изучен травяно-кустарничковый ярус, являющийся одним из наиболее уязвимых структурных элементов березовых фитоценозов Красноярской лесостепи. Цель исследования – оценка антропогенно обусловленных изменений травяно-кустарничкового яруса березовых насаждений, произрастающих в зоне многолетнего антропогенного воздействия г. Красноярска и в фоновых условиях, в 2017–2022 гг. Исследование выполнено на мониторинговых пробных площадях, заложенных в разнотравных березняках II–IV классов бонитета, V–VIII классов возраста, полнотой 0,6–0,9, произрастающих в зоне Красноярской лесостепи. На каждом объекте было отграничено по 30 учетных площадок размером 1 м², где проводили оценку видового состава, проективного покрытия и встречаемости видов подлеска и живого напочвенного покрова. Оценку осуществляли на основе сравнения с результатами мониторинговых обследований 2017 г. Исследования 2022 г. позволили заключить, что изменения травяно-кустарничкового яруса в березняках разнотравных Красноярской лесостепи обусловлены антропогенными нагрузками (рекреационной и пасквальной). Следствием увеличения рекреационного воздействия на растительный покров становится его синантропизация. На пробной площади 1 при увеличении пасквальной нагрузки повышаются видовое разнообразие и индекс синантропизации. На пробной площади 2 – эти показатели растут за счет внедрения синантропных видов. На пробной площади 3 уменьшение рекреационной нагрузки влечет демутацию березового ценоза: повышение видового разнообразия при снижении индекса синантропизации. На пробных площадях 4, 7 индексы видового разнообразия снижаются. На пробной площади 6 при неизменном уровне рекреационной нагрузки увеличивается видовое разнообразие за счет внедрения видов, не относящихся к синантропной группе. На ненарушенной пробной площади 5 видовой состав живого напочвенного покрова, а также его структура и запас фитомассы не претерпели существенных изменений.

Ключевые слова: березовые ценозы, травяно-кустарничковый ярус, нарушенный лесной фитоценоз, Красноярская лесостепь, видовое разнообразие фитоценоза, синан-

тропизация, индекс синантропизации, индекс видового разнообразия, антропогенная нагрузка

Благодарности: Работа выполнена в рамках базового проекта фундаментальных исследований Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты» FWES-2024-0028, регистрационный номер НИОКТР 124012900557-0.

Для цитирования: Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П. Динамика структуры травяно-кустарничкового яруса березовых насаждений Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 183–193.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-183-193>

Brief report

Dynamics of the Grass and Shrub Layer Structure in Birch Stands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe

Irina A. Goncharova^{1,2✉}, *Candidate of Biology, Research Scientist;*

ResearcherID: [AAF-6890-2019](https://orcid.org/0000-0002-3495-9979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-9979>

Larisa N. Skripal'shchikova¹, *Candidate of Biology, Assoc. Prof., Senior Research*

Scientist; ResearcherID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

Aleksei P. Barchenkov¹, *Candidate of Biology, Senior Research Scientist;*

ResearcherID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>

¹V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, ul. Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, Russia, 660036; iagoncharova007@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, alexbarchenkov@mail.ru

²Krasnoyarsk Regional Museum, Krasnoyarsk, ul. Dubrovinskogo, 84, Krasnoyarsk, Russia, 660049; iagoncharova007@mail.ru✉

Received on March 19, 2025 / Approved after reviewing on June 10, 2025 / Accepted on June 13, 2025

Abstract. The paper studies one of the most vulnerable structural elements of birch phytocenoses in the Krasnoyarsk forest-steppe – the grass and shrub layer. This research aims at assessing anthropogenic changes in the grass and shrub layer of birch stands growing in an area of long-term human impact in Krasnoyarsk and in natural conditions during the period of 2017–2022. The research was carried out at the monitoring sample plots laid out in mixed-grass birch forests growing in the Krasnoyarsk forest-steppe with the following parameters: II–IV quality class, V–VIII age class, and stand density of 0.6–0.9. At each site, 30 (1 m²) survey plots were set up to assess the species composition, projective cover, and abundance of understory species and living ground cover. The assessment was based on a comparison with the results of the 2017 monitoring surveys. The 2022 studies led to the conclusion that changes in the grass and shrub layer of mixed-grass birch forests in the Krasnoyarsk forest-steppe are caused by human activities (recreational and livestock-related). The increased recreational pressure on vegetation leads to its synanthropization. At the sample plot 1, an increase in the livestock-related load leads to an increase in species diversity and synanthropization index. At the sample plot 2, an increase in species diversity and synanthropization index is due to the introduction of synanthropic species. At the sample plot 3, a reduction in recreational pressure leads to the demutation of the birch community: an increase in species diversity

accompanied by a decrease in synanthropization index. At the sample plots 4 and 7, species diversity indices are decreasing. At the sample plot 6, with recreational pressure remaining constant, species diversity increases due to the introduction of species that do not belong to the synanthropic group. In the undisturbed sample plot 5, the species composition of the living ground cover, as well as its structure and phytomass stock, have not undergone significant changes.

Keywords: birch communities, grass and shrub layer, disturbed forest community, Krasnoyarsk forest-steppe, phytocenosis species diversity, synanthropization, synanthropization index, species diversity index, anthropogenic pressure

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the basic fundamental research project of the V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, titled “Biodiversity of Siberian Forests: Ecological and Dynamic, Genetic and Breeding, Physical and Chemical, Resource and Technological Aspects” (FWES-2024-0028), registration number – 124012900557-0.

For citation: Goncharova I.A., Skripal'shchikova L.N., Barchenkov A.P. Dynamics of the Grass and Shrub Layer Structure in Birch Stands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 183–193. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-183-193>

Введение

Березовые насаждения, произрастающие в Красноярской лесостепи, длительное время подвергаются мощному антропогенному прессу г. Красноярска. Основными антропогенными факторами, влияющими на пригородные леса, являются техногенное загрязнение, рекреационные нагрузки, рубки, пожары, выпас скота, сенокошение. Различные аспекты развития березовых ценозов под воздействием антропогенного пресса отражены в многочисленных публикациях [5, 6, 8, 10, 12, 14, 24, 27]. Отмечено, что нарушения березовых сообществ слабой и средней интенсивности могут принимать обратимый характер при условии ограничения антропогенного воздействия [26, 28]. Одним из наиболее уязвимых структурных элементов лесных фитоценозов является травяно-кустарничковый ярус. Ранее проведенное исследование [2] показало, что, несмотря на непрекращающееся техногенное воздействие, березовые ценозы, произрастающие в Красноярской лесостепи, в настоящий момент в большей степени подвержены трансформации из-за рекреационного, чем техногенного фактора. Интенсивность рекреационного воздействия на лесные фитоценозы постоянно изменяется, поэтому мониторинг состояния растительного покрова является важной задачей для изучения антропогенно обусловленных изменений нарушенных лесных фитоценозов.

Цель исследования – оценка антропогенно обусловленных изменений травяно-кустарничкового яруса березовых насаждений Красноярской лесостепи в зоне многолетнего антропогенного воздействия в г. Красноярске и фоновых условиях в 2017–2022 гг.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в 2017 и 2022 гг. на мониторинговых пробных площадях (ПП), заложенных по общепринятым методикам [1, 17] в разнотрав-

ных березняках (*Betula pendula* Roth) в Красноярской лесостепи [2]. Почвы характеризуются как антропогенно преобразованные и техногенные [18]. Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев приведена в табл. 1.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационная характеристика березовых насаждений за 2017 г.
Forestry and inventory characteristics of birch stands for 2017

ПП	Состав древостоя	Тип леса	Средние		Класс бонитета	Класс возраста	Полнота древостоя
			высота, м	диаметр, см			
1	10Б	Злаково-разнотравный	16,3 ± 0,3	15,6 ± 0,4	IV	V	0,8
2	10Б+С	Разнотравно-злаковый	23,5 ± 0,4	14,3 ± 0,3	III	V	0,7
3	10Б		23,5 ± 0,4	17,2 ± 0,4	III	VI	0,6
4	10Б+С	Разнотравно-осоковый	20,7 ± 0,3	17,3 ± 0,4	II	V	0,9
5	10Б+Ос, С		20,7 ± 0,4	22,9 ± 0,4	II	VI	0,9
6	10Б		22,5 ± 0,4	30,3 ± 0,6	IV	VIII	0,6
7	10Б	Разнотравный	22,4 ± 0,4	30,2 ± 0,5	IV	VIII	0,6

В августе 2017 и 2022 гг. в березовых фитоценозах в пределах каждой ПП было заложено по 30 учетных площадок размером 1 м², где проводили оценку площади тропинойной сети, видового состава травяно-кустарничкового яруса, проективного покрытия и встречаемости видов по общепринятым методикам [16, 19]. Номенклатура сосудистых растений приведена согласно [15]. Для сравнительной оценки флористических списков применяли коэффициент Серенсена–Чекановского (Ksc) [22]. Характеристику видового богатства выполняли посредством расчета показателей биоразнообразия (индексы Маргалефа, Шеннона, Симпсона) [13]. Степень трансформации живого напочвенного покрова оценивали по доле участия синантропных видов в составе фитоценоза (индекс синантропизации) [3]. Под синантропными растениями подразумеваются как местные, так и инорайонные растения, позиции которых в составе растительных сообществ усиливаются при возрастании на них антропогенных нагрузок [4]. Для оценки запаса фитомассы травяно-кустарничкового покрова на каждой пробной площади взяты укусы с 10 учетных площадок размером 20 × 25 см. Влияние рекреационных нагрузок изучалось с применением оценочных шкал дигрессии [7]. Обработку количественных данных осуществляли с помощью программного обеспечения Palstat [25].

Ниже представлено краткое описание исследованных ПП.

ПП 1. Ценоз подвергается пасквальному воздействию. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса – 70 %. Доминанты: *Lathyrus pratensis* L., *Artemisia tanacetifolia* L., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth. Мохово-лишайниковый ярус отсутствует.

ПП 2. Березовое насаждение испытывает рекреационное воздействие (развита тропинойная сеть). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 80 %. Доминантами являются *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Vicia unijuga* A. Braun, *Thalictrum minus* L. Мохово-лишайниковый покров не выражен.

ПП 3. Фитоценоз испытывает рекреационное влияние. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 70 %. Доминанты –

E. repens, *Carex obtusata* Lilj. *Geranium sylvaticum* L. Мохово-лишайниковый ярус не представлен.

ПП 4. Березняк подвергается рекреационному воздействию, развита дорожно-тропиночная сеть. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса равняется 80 %. Доминанты – *Carex macroura* Meinsh., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *V. unijuga*. Мохово-лишайниковый ярус с проективным покрытием 3 % представлен в виде отдельных пятен *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.

ПП 5. Фон. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 70 %. Доминанты – *C. macroura*, *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *V. unijuga*. Мохово-лишайниковый покров (с проективным покрытием 3 %) представлен *Pleurozium schreberi* и *Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) De Not.

ПП 6. На пробной площади отмечены следы рекреации, выражена дорожно-тропиночная сеть. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 70 %. Доминанты – *C. macroura*, *V. unijuga*, *Rubus saxatilis* L. Мохово-лишайниковый ярус (проективное покрытие – 5 %) образован *P. schreberi* и *Plagiomnium ellipticum* (Brid.) T.J.Kop.

ПП 7. Ценоз подвержен рекреационному воздействию, развита дорожно-тропиночная сеть. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса достигает 90 %. Доминантами выступают *Agrimonia pilosa* Ledeb., *Cimicifuga foetida* L., *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce. Мохово-лишайниковый покров не выражен.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным исследования 2017 г., в изучаемых березовых ценозах было зафиксировано 3 древесных вида, 12 видов кустарников, 113 видов травяно-кустарничкового яруса и 3 вида мхов. В 2022 г. выявлено 3 вида древесного яруса, 13 видов кустарников, 110 видов травяно-кустарничкового яруса, 3 вида мхов. Максимальные изменения в видовом составе за 5 лет произошли на ПП 6 ($K_{sc} = 0,75$), наименьшие – на фоновой ПП 5 ($K_{sc} = 0,93$) (табл. 2).

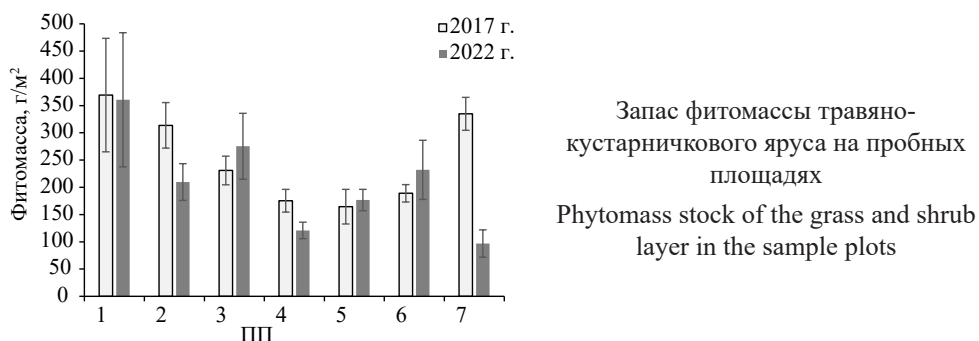
Таблица 2

Показатели напочвенного покрова за 2017 и 2022 гг.
Ground cover parameters for 2017 and 2022

ПП	Коэффициент Серенсена–Чекановского*	Индекс Маргалефа		Индекс Шеннона		Индекс Симпсона		Число видов, шт.				Индекс синантропизации		Стадия дигрессии	
		2017	2022	2017	2022	2017	2022	на ПП		на 1 м²		2017	2022	2017	2022
								2017	2022	2017	2022				
1	0,86	7,75	8,23	2,95	3,02	0,91	0,91	43	45	4	4	11,9	14,0	III	IV
2	0,92	8,77	8,87	3,15	3,25	0,92	0,94	47	49	5	7	14,9	18,4	II	III
3	0,84	9,84	10,11	3,34	3,52	0,96	0,96	54	56	5	5	33,3	30,4	IV	III
4	0,90	9,95	9,10	2,60	2,55	0,85	0,87	51	45	5	5	5,8	6,6	II	III
5	0,93	6,93	7,63	2,72	2,93	0,87	0,90	36	39	5	5	0	0	–	–
6	0,75	6,07	6,97	2,74	2,79	0,89	0,89	31	36	4	4	12,9	11,1	II	II
7	0,87	11,11	10,32	3,65	3,44	0,96	0,95	59	54	6	5	8,5	11,1	III	III

*Коэффициент Серенсена–Чекановского показывает сходство видового состава между 2017 и 2022 гг.

ППП 1. За 5-летний период видовой состав и структура растительного покрова претерпели изменения ($K_{sc} = 0,86$). Доминанты живого напочвенного покрова остались те же, однако проективное покрытие *Calamagrostis epigeios* и *Artemisia tanacetifolia*, т. е. видов, устойчивых к уплотнению почвы [20], увеличилось, тогда как проективное покрытие малоустойчивого к вытаптыванию *Lathyrus pratensis* сократилось. Индексы видового разнообразия (Маргалефа и Шеннона) увеличились, что обусловлено внедрением в фитоценоз видов, имеющих мощный стебель и плохо поедаемых мелким рогатым скотом (*Cimicifuga foetida*, *Heracleum dissectum* Ledeb.), а также синантропных видов (*Pastinaca sylvestris* Mill., *Achillea millefolium* L.), что, в свою очередь, обусловило увеличение индекса синантропизации. Следует отметить, что появившийся в фитоценозе вид *Pastinaca sylvestris* относится к инвазионным видам во флоре Красноярского края, внесенным в Черную книгу флоры Сибири и имеющим статус 2 (чужеродные виды, активно расселяющиеся и натурализующиеся в нарушенных полуестественных и естественных местообитаниях) [21, 23]. Наряду с появлением новых видов на ППП отмечено исчезновение *Anemone sylvestris* L., *Tragopogon orientalis* L., *Vicia amoena* Fisch. В связи с этим количество видов на пробной площади увеличилось незначительно, а видовая насыщенность не изменилась. Антропогенные изменения сообществ, выраженные в сдвигах флористического состава в сторону широкого участия синантропных видов, отмечены и другими авторами [6]. Фитомасса живого напочвенного покрова осталась на прежнем уровне ($p > 0,05$) (см. рисунок), однако структура фитомассы претерпела изменения: доля синантропных видов увеличилась ($p < 0,05$) с 2,1 до 5,2 %.



За 5-летний период площадь тропинойной сети увеличилась с 15 до 40 %. Отмечены механические повреждения видов подлеска. Перечисленное свидетельствует об увеличении пастбищной нагрузки. Стадия дигрессии изменилась с III на IV.

ППП 2. За 5 лет площадь тропинойной сети выросла с 5 до 15 %. Видовой состав пополнился синантропными видами *Geum urbanum* L., *Trifolium repens* L., что привело к росту индексов видового разнообразия и синантропизации. Наряду с этим увеличилось ($p < 0,05$) проективное покрытие как синантропных видов (*Agrimonia pilosa*, *Plantago media* L., *Artemisia vulgaris* L.), так и видов, не являющихся синантропными, однако устойчивых к вытаптыванию (*Calamagrostis arundinacea*, *Carex macroura*). На ППП отмечен рост видовой насыщенности, что характерно для ранних стадий дигрессии [11]. Фитомасса живого напочвенного

покрова уменьшилась ($p < 0,05$). За исследуемый период рекреационная нагрузка увеличилась, фитоценоз перешел из II в III стадию дигрессии.

ППП 3. По сравнению с 2017 г. на ПП изменился видовой состав травяно-кустарничкового яруса ($K_{sc} = 0,84$). Появились виды, не отмеченные ранее: *Aconitum barbatum* Pers., *Trifolium lupinaster* L., *Kadenia dubia* (Schkuhr) Lavrova & V.N. Tikhom., *Campanula glomerata* L. и др. Одновременно с этим из напочвенного покрова исчезли такие представители синантропной растительности, как *Linaria vulgaris* Mill., *Plantago lanceolata* L. Доминанты и проективное покрытие напочвенного покрова не изменились. Площадь тропинойной сети снизилась с 20 до 15 %. Количество и структура фитомассы не изменились ($p > 0,05$). Можно сделать вывод о снижении рекреационного воздействия за последние 5 лет в данном фитоценозе в результате демутации, вместо IV стадии дигрессии, зафиксированной в 2017 г., в 2022 г. отмечена III стадия.

ППП 4. Площадь тропинойной сети за 5 лет увеличилась с 5 до 15 %. Видовое разнообразие сократилось. Исчез ряд видов: *Cypripedium macranthos* Sw., *Anemonastrum narcissiflorum* (L.) Holub, *Viola mirabilis* L. и др. Необходимо отметить, что *Cypripedium macranthos* занесен в Красную книгу Красноярского края со статусом 2 (V) [9]. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса сократилось ($p < 0,05$) с 90 до 70 %. Состав доминантов напочвенного покрова не изменился, но снизилось их проективное покрытие ($p < 0,05$). Наряду с этим проективное покрытие синантропного вида *Agrimonia pilosa* увеличилось с 3 до 10 %. Фитомасса живого напочвенного покрова снизилась с 175,4 до 120,9 г/м², доля синантропных видов в фитомассе повысилась с 1,9 до 3,8 %. Перечисленное свидетельствует о росте рекреационной нагрузки, данный фитоценоз характеризуется III стадией дигрессии.

ППП 5. Тропинойная сеть отсутствует, следы рекреации не отмечены. За 5-летний период видовой состав растительности претерпел незначительные изменения ($K_{sc} = 0,93$). Состав кустарничкового яруса пополнился видом *Cotoneaster melanocarpus*, а травяно-кустарничкового яруса – двумя видами, это *Cypripedium macranthos*, *Geranium sylvaticum* L. Проективное покрытие и доминанты живого напочвенного покрова не изменились. Синантропные виды на ПП отсутствуют. Количество и структура фитомассы напочвенного покрова существенно не изменились. Фитоценоз характеризуется естественным ненарушенным растительным покровом.

ППП 6. Состав и проективное покрытие доминантов растительного покрова не изменились, однако индексы видового разнообразия возросли. Видовое богатство увеличилось за счет *Heracleum dissectum*, *Thalictrum minus*, *Angelica sylvestris* L., *Phlomodites tuberosa* (L.) Moench, *Cimicifuga foetida*. Исчезли как синантропные *Trifolium repens*, *Plantago lanceolata*, так и не относящиеся к синантропной группе *Viola mirabilis*, *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt. Достоверного изменения проективного покрытия видов, различных по степени устойчивости к уплотнению почвы не зафиксировано ($p > 0,05$). Запас фитомассы живого напочвенного покрова остался прежним. Площадь тропинойной сети сохранилась на уровне 5 %. Изложенное свидетельствует о том, что уровень рекреационной нагрузки не изменился, фитоценоз характеризуется II стадией дигрессии.

ППП 7. Индексы флористического разнообразия и видовая насыщенность снизились. За 5-летний период исчезли *Cypripedium guttatum* Sw. (Красная

книга Красноярского края со статусом редкости 3(R)) [9], *Hemerocallis lilio-asphodelus* L., *Anemone sylvestris*, *Maianthemum bifolium*, *Pulsatilla flavescens* (Zucc.) Juz., но появились синантропные виды *Glechoma hederacea* L., *Plantago lanceolata*. Состав доминантных видов не изменился. Увеличилось проективное покрытие синантропного вида *Agrimonia pilosa* и вида, не относящегося к группе синантропных, однако устойчивого к уплотнению почвы – *Carex macroura* ($p < 0,05$). Наряду с этим уменьшилось ($p < 0,05$) проективное покрытие *Aconitum volubile* Pall. ex Koelle, *Heracleum dissectum*, *Thalictrum minus*, *Iris ruthenica* Ker Gawl. Количество фитомассы напочвенного покрова снизилось в 3,5 раза. Сходные тенденции изменения структуры напочвенного покрова при рекреационном влиянии отмечены другими исследователями [27]. В структуре фитомассы доля синантропных видов увеличилась с 2,4 до 5,2 %. Площадь тропинойной сети возросла с 10 до 15 %. Можно сделать вывод о росте рекреационного воздействия за последние 5 лет, данный фитоценоз остается на III стадии дигрессии.

Заключение

Установлено, что изменения травяно-кустарничкового яруса в березняках разнотравных Красноярской лесостепи обусловлены антропогенными нагрузками (рекреационной и пасквальной). В результате увеличения рекреационного воздействия на растительный покров происходит его синантропизация.

На пробной площади 1 при увеличении пасквальной нагрузки растет видовое разнообразие и индекс синантропизации – от 11,9 до 14,0.

На пробной площади 2 индексы видового разнообразия увеличиваются за счет внедрения синантропных видов (индекс синантропизации увеличился с 14,9 до 18,4).

На пробной площади 3 в результате снижения рекреационной нагрузки происходит демутация березового ценоза: увеличение видового разнообразия при снижении индекса синантропизации от 33,3 до 30,4.

На пробных площадях 4, 7 индексы видового разнообразия снижаются из-за исчезновения из видового состава гемерофобных видов, индекс синантропизации увеличивается от 5,8 до 6,6 и от 8,5 до 11,1 на пробных площадях 4 и 7 соответственно.

На пробной площади 6 при неизменном уровне рекреационной нагрузки за счет внедрения видов, не относящихся к синантропной группе, увеличивается видовое разнообразие, индекс синантропизации снижается от 12,9 до 11,1.

На ненарушенной пробной площади 5 видовой состав живого напочвенного покрова, а также его структура и запас фитомассы не претерпели существенных изменений, индекс синантропизации равен 0.

Алгоритм и результаты работы могут быть полезны для оценки рекреационного воздействия на растительный покров, что имеет высокое практическое значение в связи с постоянно растущим влиянием антропогенных факторов на растительные сообщества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анухин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.
Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).

2. Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П., Шушпанов А.С. Оценка компонентов нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных березняках Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 75–87.

Goncharova I.A., Skripal'shchikova L.N., Barchenkov A.P., Shushpanov A.S. Understory Vegetation Cover Components Assessment in Anthropogenically Disturbed Birch Stands of Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 1, pp. 75–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-75-87>

3. Горчаковский П.Л. Антропогенные изменения растительности: мониторинг, оценка, прогнозирование // Экология. 1984. № 5. С. 3–16.

Gorchakovskiy P.L. Anthropogenic Changes in Vegetation: Monitoring, Assessment, Prognostication. *Ekologia* = Russian Journal of Ecology, 1984, no. 5, pp. 3–16. (In Russ.).

4. Горчаковский П.Л. Лесные оазисы Казахского мелкосопочника М.: Наука, 1987. 157 с.

Gorchakovskiy P.L. *Forest Oases of the Kazakh Uplands*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 157 p. (In Russ.).

5. Ефимова А.П. Антропогенные изменения состава и структуры лесных и кустарниковых сообществ долины средней Лены // Вестн. Якутск. гос. ун-та. 2009. Т. 6, № 1. С. 14–21.

Efimova A.P. Anthropogenic Changes in Make-up and Structure of Forest and Scrub Associations of Middle Lena Valley. *Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 14–21. (In Russ.).

6. Ефимова А.П. Пастбищная дигрессия лесов и кустарниковых сообществ долины средней Лены // Успехи соврем. естествознания. 2016. № 5. С. 53–57.

Efimova A.P. A Pastoral Digression of the Middle Lena Valley Forest and Shrub Communities. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* = Advances in current natural sciences, 2016, no. 5, pp. 53–57. (In Russ.).

7. Казанская Н.С., Ланина В.В., Марфенин Н.Н. Рекреационные леса: Состояние, охрана, перспективы использования. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 96 с.

Kazanskaya N.S., Lanina V.V., Marfenin N.N. *Recreational Forests: Status, Protection, Prospects for Use*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 96 p. (In Russ.).

8. Казанцева М.Н., Чернобай Е.С. Особенности послепожарной сукцессии березняка разнотравного в подтайге Западно-Сибирской равнины // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2011. № 11. С. 102–109.

Kazantseva M.N., Chernobaj Ye.S. Features of Post-Fire Succession of Birch Mixed Grass Forests in Subtaiga of West Siberian Plain. *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2011, no. 11, pp. 102–109. (In Russ.).

9. Красная книга Красноярского края: в 2 т. Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / гл. ред. Н.В. Степанов, 3-е изд., перераб. и доп. Красноярск: СФУ, 2022. 762 с.

The Red Data Book of Krasnoyarsk Territory: In 2 Vols. Vol. 2. The Rare and Endangered Species of Wild Plants and Fungi. Editor-in-Chief N.V. Stepanov. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2022. 762 p. (In Russ.).

10. Кругляков П.М. Динамика флористического состава березняков правобережья Оби под влиянием рубки различной интенсивности: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2006. 19 с.

Kruglyakov P.M. *Dynamics of the Floristic Composition of Birch Forests on the Right Bank of the Ob River Under the Influence of Logging of Varying Intensity*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Tomsk, 2006. 19 p. (In Russ.).

11. Кузнецов В.А. Почвы и растительность парково-рекреационных ландшафтов Москвы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2015. 26 с.

Kuznetsov V.A. *Soils and Vegetation of Park and Recreational Landscapes of Moscow*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2015. 26 p. (In Russ.).

12. Левчук Л.А. Состояние березовых насаждений и вегетативное возобновление березы в условиях фтористых загрязнений: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Свердловск. 1991. 25 с.

Levchuk L.A. *The State of Birch Plantations and Vegetative Regeneration of Birch Under Conditions of Fluoride Pollution*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Sverdlovsk, 1991. 25 p. (In Russ.).

13. Миркин Б.М., Розенберг Г.С., Наумова Л.Г. Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М.: Наука, 1989. 222 с.

Mirkin B.M., Rosenberg G.S., Naumova L.G. *Dictionary of Concepts and Terms of Modern Phytocenology*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 222 p. (In Russ.).

14. Назаренко Н.Н., Батюшева С.Ю. Трансформация растительности в условиях неинтенсивной сельскохозяйственной нагрузки (на примере окрестностей деревни Октябрьск Учалинского района Республики Башкортостан) // Сам. науч. вестн. 2021. Т. 10, № 1. С. 121–127.

Nazarenko N.N., Batyusheva S.Yu. Vegetation Dynamics Under Non-Strong Agricultural Impact (by the Example of Oktyabrsk Village Environs in the Uchalinskiy District of the Republic of Bashkortostan). *Samara Journal of Science*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 121–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/snv2021101119>

15. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2025. Режим доступа: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 11.03.25).

Plantarium. Plants and Lichens of Russia and Neighboring Countries: Open Online Galleries and Plant Identification Guide. 2007–2025. (In Russ.).

16. Полевая геоботаника. Т. 3. / ред. А.А. Корчагин и др. Л.: Наука, Ленингр. отделение, 1964. 530 с.

Field Geobotany. Vol. 3. Ed. by A.A. Korchagin et al. Leningrad, Nauka, Leningrad Branch Publ., 1964. 530 p. (In Russ.).

17. Программа и методика биогеоценологических исследований / В.Н. Сукачев, Н.В. Дылис, Ю.Л. Раунер и др. М.: Наука, 1974. 403 с.

Program and Methods of Biogeocenological Studies. Ed. by V.N. Sukachev, N.V. Dylis, Yu.L. Rauner et al. Moscow, Nauka Publ., 1974. 403 p. (In Russ.).

18. Скрипальщикова Л.Н., Пономарева Т.В., Бажина Е.В., Барченков А.П., Белянин А.В. Техногенные нагрузки на березняки Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 130–135.

Skrpal'shchikova L.N., Ponomareva T.V., Bazhina E.V., Barchenkov A.P., Belyanin A.V. Technogenic Loads on Birch Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2017, no. 6, pp. 130–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170611>

19. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: АН СССР, 1961. 144 с.

Sukachev V.N., Zonn S.V. *Methodological Guidelines for Studying Forest Types*. Moscow, AN SSSR Publ., 1961. 144 p. (In Russ.).

20. Таран И.В., Спиридонов В.Н. Устойчивость рекреационных лесов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. 179 с.

Taran I.V., Spiridonov V.N. *Stability of Recreational Forests*. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1977. 179 p. (In Russ.).

21. Черная книга флоры Сибири / А.Л. Эбель, А.Н. Куприянов, Т.О. Стрельникова, Е.С. Анкипович, Е.М. Антипова и др. Новосибирск: Гео, 2016. 440 с.

Ebel A.L., Kupriyanov A.N., Strelnikova T.O., Ankipovich E.S., Antipova E.M., et al. *The Black Book of Siberian Flora*. Novosibirsk, Geo Publ., 2016. 440 p. (In Russ.).

22. Шмидт В.М. Математические методы в ботанике. Л.: Ленингр. ун-т, 1984. 288 с.
Schmidt V.M. *Mathematical Methods in Botany*. Leningrad, Leningrad University Publ., 1984. 288 p. (In Russ.).

23. Эбель А.Л., Стрельникова Т.О., Куприянов А.Н., Аненхонов О.А., Анкипович Е.С. и др. Инвазионные и потенциально инвазионные виды Сибири // Бюл. ГБС. 2014. № 1. С. 52–62.

Ebel A.L., Strelnikova T.O., Kupriyanov A.N., Anenkhonov O.A., Anipovich E.S., et al. Invasive and Potentially Invasive Species in Siberia. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the Central Botanical Garden, 2014, no. 1, pp. 52–62. (In Russ.).

24. Bell F.W., Lamb E.G., Sharma M., Hunt S., Anand M., Dacosta J., et al. Relative Influence of Climate, Soils, and Disturbance on Plant Species Richness in Northern Temperate and Boreal Forests. *Forest Ecology and Management*, 2016, no. 381, pp. 93–105.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.016>

25. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 2001, vol. 4, iss. 1. 9 p.

26. Popova E.I. Accumulation of Heavy Metals in Birch and Pine Forest Roadside Phytocenoses in the South of Tyumen Region. *Biosystems Diversity*, 2018, vol. 26(3), pp. 233–238. <https://doi.org/10.15421/011835>

27. Sokolova G.G., Borodulina I.D. Natural and Anthropogenic Fragmentation of the Birches in the Forest-Steppe Zone of the Altai Territory. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2018, no. 8(4), pp. 370–374.

28. Togonidze N. Climate Changes and Anthropogenic Influence on Subalpine Birch Forest. *International Journal of Research and Innovations in Earth Science*. 2015, vol. 2, iss. 4, pp. 2394–1375.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Краткое сообщение

УДК 633.11:630*116.64

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-194-204

Полезацищные лесополосы *Quercus robur* L. и *Fraxinus excelsior* L. в степной зоне

Грибачева О.В., канд. биол. наук; ResearcherID: [ADS-2635-2022](https://orcid.org/0000-0002-6192-3939),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6192-3939>

Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова, тер. ЛНАУ,
д. 1, Артемовский р-н, г. Луганск, Россия, 291008; kaffles@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04.25 / Одобрена после рецензирования 24.06.25 / Принята к печати 27.06.25

Аннотация. Территория Луганской Народной Республики относится к степной зоне и расположена в бассейне среднего течения р. Северского Донца. Цель работы – изучить таксационные показатели и влияние полезацищной лесополосы на биометрические показатели озимой пшеницы. Взяты 2 пробные площади: на 1-й древостой в верхнем ярусе представлен преимущественно сухостоем и незначительным количеством деревьев II и III классов Крафта; на 2-й – состоит из деревьев I, II и III классов Крафта. Наибольшая средняя высота *Fraxinus excelsior* L. выявлена во 2-й повторности – $9,9 \pm 0,23$ м, где средний ярус образован *F. excelsior* L. и *Prunus mahaleb* L., при этом в верхнем ярусе нет деревьев *Quercus robur* L. Сделан вывод о том, что при наличии *Q. robur* L. и *F. excelsior* L. в верхнем ярусе для выполнения лесополосой ее сельскохозяйственных функций достаточно одной сопутствующей породы, например *Acer tataricum* L. Установлено, что средняя высота *F. excelsior* L. изменялась от $7,8 \pm 0,34$ до $9,9 \pm 0,23$ м, а в некоторых случаях до 12,3 м, что свидетельствует о необходимости проведения лесохозяйственных мероприятий, направленных на улучшение условий местопроизрастания. Единично встречаются деревья *F. excelsior* L. высотой 30 м (4-я повторность). Выявлено, что при наличии в древостое сопутствующей породы *P. mahaleb* L. (высота $4,2 \pm 0,39$ м) *A. tataricum* L. имел высоту $3,5 \pm 0,14$ м. Средняя высота *Q. robur* L. во всех повторностях не превышала $13,4 \pm 0,71$ м. В результате выявлено, что максимальная прибавка урожая озимой пшеницы наблюдается на расстоянии 5–15 м от лесополосы с сохранившимся древостоем, а без древостоя – 5–10 м от лесополосы.

Ключевые слова: полезацищная лесополоса, средний диаметр древостоя, средняя высота древостоя, дальность влияния лесополосы, *Fraxinus excelsior* L., *Quercus robur* L., озимая пшеница, биометрические показатели пшеницы

Для цитирования: Грибачева О.В. Полезацищные лесополосы *Quercus robur* L. и *Fraxinus excelsior* L. в степной зоне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 194–204. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-194-204>

Brief report

Protective Forest Belts of *Quercus robur* L. and *Fraxinus excelsior* L. in the Steppe Zone

Olesya V. Gribacheva, Candidate of Biology; ResearcherID: [ADS-2635-2022](https://orcid.org/0000-0002-6192-3939),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6192-3939>

© Грибачева О.В., 2026



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

Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov, ter. LNAU, 1, Artyomovskiy District, Lugansk, Russia, 291008; kaffles@mail.ru

Received on April 7, 2025 / Approved after reviewing on June 24, 2025 / Accepted on June 27, 2025

Abstract. The Lugansk People's Republic is covered by steppe terrain and lies in the middle reach of the Seversky Donets River basin. The research aims at studying the inventory parameters and the influence of the protective forest belt on the biometric parameters of winter wheat. Two sample plots were surveyed. In the first plot, the upper layer consists mainly of dead tree stand and a small number of trees of II and III Kraft classes. In the second plot, the stand consists of trees of I, II, and III Kraft classes. The highest average height of *Fraxinus excelsior* L. was observed in the 2nd replication, which was 9.9 ± 0.23 m, where the middle layer consists of *Fraxinus excelsior* L. and *Prunus mahaleb* L., while the upper layer contains no *Quercus robur* L. trees. It has been found that, in the presence of *Q. robur* L. and *F. excelsior* L. in the upper layer, a single accompanying species, such as *Acer tataricum* L., is sufficient for the protection forest belt to perform its agricultural functions. It was found that the average height of *F. excelsior* L. ranged from 7.8 ± 0.34 to 9.9 ± 0.23 m, and in some cases reached 12.3 m, indicating the need for silvicultural measures aimed at improving site conditions. There are also individual trees of *F. excelsior* L. with a height of 30 m (4th repetition). It was found that when *P. mahaleb* L. (height 4.2 ± 0.39 m) was present in the stand, *A. tataricum* L. reached a height of 3.5 ± 0.14 m. The average height of *Q. robur* L. did not exceed 13.4 ± 0.71 m in all repetitions. The results have shown that the greatest increase in winter wheat yield was observed 5–15 m from the protective forest belt with the preserved tree stand, and 5–10 m from the forest belt where no tree stands remained.

Keywords: protective forest belt, average stand diameter, average stand height, forest belt influence range, *Fraxinus excelsior* L., *Quercus robur* L., winter wheat, wheat biometric parameters

For citation: Gribacheva O.V. Protective Forest Belts of *Quercus robur* L. and *Fraxinus excelsior* L. in the Steppe Zone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 194–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-194-204>

Введение

Территория Луганской Народной Республики находится в зоне рискованного земледелия, где влага является лимитирующим фактором. Насыщение почвы влагой в большей степени происходит в осенне-зимний период, когда земля бывает промерзшая, в связи с чем наблюдаются эрозионные процессы [3].

Основным барьером для прекращения водной эрозии и уменьшения скорости ветра выступают преимущественно линейные насаждения в виде стокорегулирующих и полезащитных лесополос [1, 2, 5, 6, 8–11, 14–20]. В.В. Докучаев доказал, что лентообразные посадки в степи должны служить для защиты посевов от ветров, бурь и суховеев, урегулирования снежного покрова, накопления в надлежащих местах снежных сугробов и валов и закрепления склонов оврагов [12]. Разработка основ полезащитного лесоразведения во время экспедиции В.В. Докучаева (1892–1898 гг.) и создание законченной системы полезащитных лесополос в степной зоне в 1950–1990 гг. позволило решить ряд задач: уменьшить колебания температуры и влажности воздуха

и почв; поднять уровень грунтовых вод; более правильно распределить снежный покров с накоплением в желаемых местах снежных масс.

В связи с усыханием древесных пород или разрастанием кустарникового яруса в лесополосах наблюдается повсеместное нарушение рекомендуемой для степной зоны конструкции. В сочетании с засухой и пыльными бурями это способствует снижению урожаев сельскохозяйственных культур и является одним из факторов, влияющих на численность птиц.

Проведение земельной реформы на исследуемой территории способствовало передаче земель вместе с полевзщитными полосами в коллективную собственность без их инвентаризации и без разработки контурно-мелиоративной организации территории. С 2014 г. полевзщитные полосы Донбасса являются по сути бесхозными, несмотря на то, что в 2001 г. были переданы в ведение местным администрациям, однако фактически мероприятия по содержанию, уходу и восстановлению лесополос за весь этот период не проводились. Система полевзщитных лесополос сильно пострадала от несанкционированных сельскохозяйственных палов, самовольных рубок и боевых действий, поэтому работа по инвентаризации и их оценке является важной и актуальной.

Цель работы – изучить таксационные показатели полевзщитной лесополосы и ее влияние на биометрические характеристики озимой пшеницы.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в полевзщитных полосах (рис. 1) на территории Государственного унитарного предприятия Луганской Народной Республики «Агрофонд» в 2 этапа: 1-й этап (2019 г.) – фиксация средних диаметра и высоты в полевзщитной полосе, 2-й (2024 г.) – изучение влияния полевзщитной полосы без древостоя и с древостоем на биометрические параметры озимой пшеницы.



Рис. 1. Внешний вид полевзщитной лесополосы

Fig. 1. A protective forest belt

Хозяйство располагается в Артемовском районе г. Луганска. Исследуемая полевзщитная лесополоса лежит за пос. Дзержинского, а также в 3 км от пос. Юбилейный. Протяженность лесополосы составляет 1234 м, площадь – 19 744 м², а ширина – 16 м с закрайками 1,5 м. Полоса имеет 5 рядов, рассто-

яние между ними в среднем равняется 1,5 м, в ряду между деревьями – 1,5 м. Конструкция полосы характеризуется как плотная. Средний диаметр древостоя лесополосы составляет $18,4 \pm 0,87$ см, а средняя высота – $6,9 \pm 0,43$ м (2019 г.). Повторности были заложены в основной полезащитной лесополосе, формула состава древостоя которой $5Я_{с_{об}}2Д_{ч}2К_{л}V_{м}$. Для 1-й повторности состав древостоя – $8Я_{с_{об}}2К_{л}$; для 2-й – $5Я_{с_{об}}3V_{м}2К_{л}$; 3-й – $6Д_{ч}3Я_{с_{об}}К_{л}$; 4-й – $7Д_{ч}2Я_{с_{об}}К_{л}$.

Древесная растительность лесополосы представлена следующими видами: *Fraxinus excelsior* L., *Acer tataricum* L., *Rosa canina* L., *Quercus robur* L., *Prunus mahaleb* L., *Lonicera tatarica* L., *Caragana arborescens* L., *P. spinose* L. Доля кустарникового яруса в основном составляет 50 %, а в некоторых местах лесополосы – 60–70 % от всей ее площади.

Травянистый ярус формируют следующие виды: *Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski, *Galium aparine* L., *Artemisia vulgaris* L., *Festuca pratensis* Huds., *Poa pratensis* L., *Cichorium intybus* L., *Plantago major* L., *Achillea millefolium* L., *Consolida regalis* S.F. Gray.

Установление видового состава древесно-кустарниковой растительности проводили с использованием определителей, атласов и справочников [4]. Пробные площади для изучения таксационных показателей древостоя закладывали согласно ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки». Диаметр древостоя измеряли с помощью мерной вилки, а среднюю высоту устанавливали путем построения графика высот.

Объект исследования – озимая пшеница сорта Алексеевич. Высота растений может достигать 81 см, сорт относится к полукарликовым. Особенность сорта заключается в его высочайшей урожайности, а также в способности сохранять вкусовые качества даже при произрастании в условиях дефицита минеральных веществ. При изучении влияния лесополосы на биометрические показатели озимой пшеницы применяли общепринятую в защитном лесоразведении методику «Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов» [7]. Биометрические показатели озимой пшеницы определяли в депрессионной зоне, прилегающей к лесополосе (на удалении 0–15 м от лесополосы), и на расстоянии 20–120 м от нее. На каждом указанном расстоянии для фиксации биометрических показателей брали по 100 растений. Контрольной точкой служила отметка 200 м, т. к. высота деревьев не превышала 25 м.

Статистический анализ данных полевых наблюдений проводили с использованием программы Statistica 10.0.1011 и с помощью методов обработки статистических данных по Б.А. Доспехову.

Результаты исследования и их обсуждение

Fraxinus excelsior L. является главной породой в полезащитной лесополосе и образует верхний ярус. Средний диаметр *F. excelsior* L. наибольший в 1-й и 2-й повторностях – $21,6 \pm 0,60$ и $20,6 \pm 0,69$ см соответственно и наименьший в 3-й и 4-й – $17,9 \pm 0,59$ и $13,7 \pm 0,53$ см соответственно (табл. 1).

Средний диаметр *F. excelsior* L. в 4-й повторности ($13,7 \pm 0,53$ см) практически совпадает со средним диаметром *Acer tataricum* L. – $12,4 \pm 0,87$ см. Древостой верхнего яруса в указанной повторности образован *Quercus robur* L., который вытесняет *F. excelsior* L. в борьбе за свет в верхнем ярусе, его средний диаметр составляет $42,4 \pm 1,32$ см. Средний диаметр *A. tataricum* L. изменяется

от $10,7\pm0,59$ (1-я повторность) до $12,6\pm0,65$ см (2-я). Средний диаметр *Prunus mahaleb* L. составляет $15,5\pm3,38$ см.

Таблица 1

Средние диаметр и высота древостоя в полезащитной лесополосе (2019 г.)
Average diameter and height of the tree stand in the protective forest belt, 2019

Повторность	Порода	Среднее	
		диаметр, см	высота, м
1	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	$21,6\pm0,60$	$7,8\pm0,34$
	<i>Acer tataricum</i> L.	$10,7\pm0,59$	$3,8\pm0,46$
2	<i>F. excelsior</i> L.	$20,6\pm0,69$	$9,9\pm0,23$
	<i>A. tataricum</i> L.	$12,6\pm0,65$	$3,5\pm0,14$
	<i>Prunus mahaleb</i> L.	$15,5\pm3,38$	$4,2\pm0,39$
3	<i>F. excelsior</i> L.	$17,9\pm0,59$	$8,2\pm0,55$
	<i>A. tataricum</i> L.	$12,0\pm0,49$	$4,2\pm0,19$
	<i>Quercus robur</i> L.	$28,4\pm1,99$	$11,6\pm0,88$
4	<i>F. excelsior</i> L.	$13,7\pm0,53$	$8,4\pm0,58$
	<i>A. tataricum</i> L.	$12,4\pm0,87$	$5,2\pm0,32$
	<i>Q. robur</i> L.	$42,4\pm1,32$	$13,4\pm0,71$

Со средним диаметром тесно связана и средняя высота древостоя. В 3-й полезащитной полосе (1-я повторность) средняя высота *F. excelsior* L. составляет $7,8\pm0,34$ м при среднем диаметре – $21,6\pm0,60$ см, а *A. tataricum* L. – $3,8\pm0,46$ м при среднем диаметре – $10,7\pm0,59$ см (рис. 2).

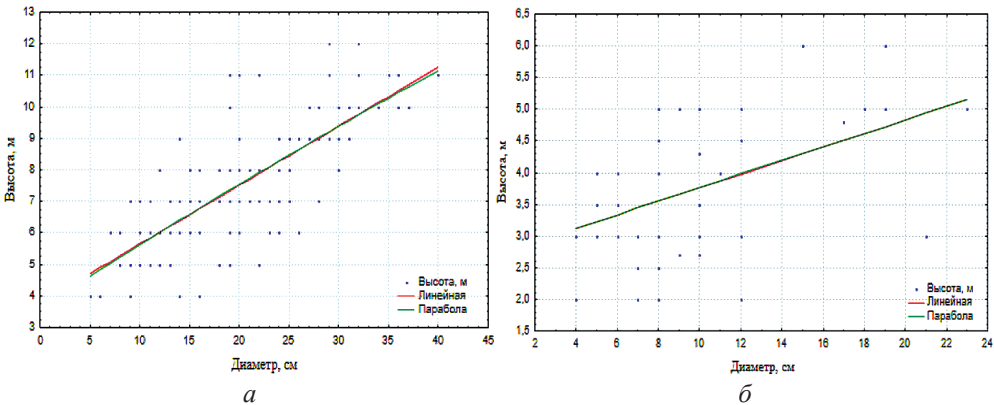


Рис. 2. Зависимость высоты от диаметра для *Fraxinus excelsior* L. (а) и *Acer tataricum* L. (б) в полезащитной полосе (1-я повторность)

Fig. 2. Height dependence on diameter for *Fraxinus excelsior* L. (a) and *Acer tataricum* L. (b) in the protective forest belt (1st replication)

Наибольшая средняя высота *F. excelsior* L. выявлена во 2-й повторности – $9,9\pm0,23$ м, где средний ярус образован *A. tataricum* L. и *P. mahaleb* L. и при этом в верхнем ярусе нет деревьев *Q. robur* L.

Так как *F. excelsior* L. обладает ажурной кроной и более высокой транспирационной способностью по сравнению с *Q. robur* L., для улучшения его роста необходимо затенение почвы, что достигается с помощью сопутствующих пород. Согласно данным А.И. Чернудова, в Каменной степи *F. excelsior* L. хорошо развивается в лесных полосах и в 70 лет формирует 3-ярусное насаждение (8Я₀2Д) со средней высотой 22,2 м, средним диаметром 22,6 см, запасом

314 м³; в 89 лет средняя высота равняется 24,5 м, средний диаметр – 34 см, запас – 359,6 м³ [13]. В изучаемых лесополосах средняя высота *F. excelsior* L. изменялась от 7,8±0,34 до 9,9±0,23 м, что свидетельствует о необходимости проведения лесохозяйственных мероприятий, направленных на улучшение условий местопроизрастания. Единично встречаются деревья *F. excelsior* L. с высотой 30 м (4-я повторность).

Средняя высота *A. tataricum* L. изменялась от 3,5±0,14 м (2-я повторность) до 5,2±0,32 м (4-я). В месте образования 2-го яруса *A. tataricum* L. и *P. mahaleb* L. средняя высота *A. tataricum* L. наименьшая – 3,5±0,14 м.

Средняя высота *Q. robur* L. во всех повторностях не превышала 13,4±0,71 м. На 3-й изменялась от 10 до 13 м, а на 4-й – от 13 до 14 м.

Нами было осуществлено распределение деревьев *F. excelsior* L. по высоте для 2-й и 4-й повторностей (рис. 3).

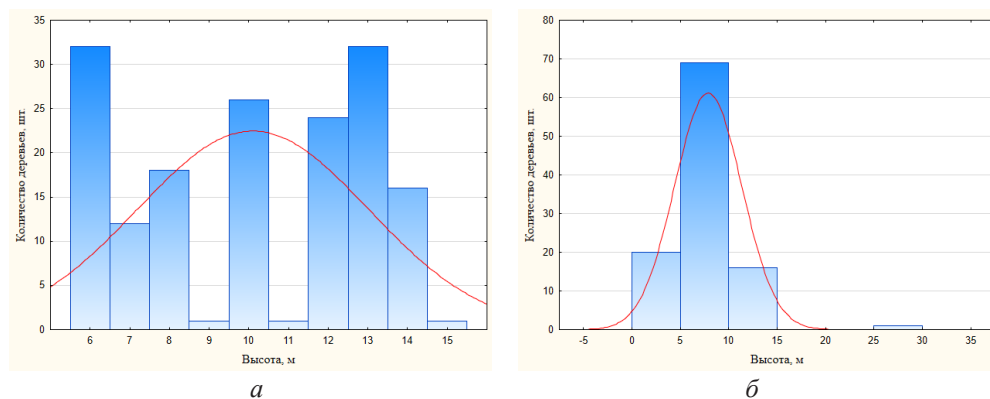


Рис. 3. Зависимость высоты от диаметра *Fraxinus excelsior* L.: а – 2-я повторность; б – 4-я повторность

Fig. 3. Height dependence on diameter for *Fraxinus excelsior* L.: а – 2nd replication; б – 4th replication

Для 2-й повторности (всего 163 наблюдения) было выявлено следующее распределение: деревьев с высотой 6 м – 32 шт. (19,63 %), 7 м – 13 шт. (7,98 %), 8 м – 17 шт. (10,43 %), 9 м – 1 шт. (0,61 %), 10 м – 26 шт. (15,96 %), 11 м – 1 шт. (0,61 %), 12 м – 24 шт. (14,72 %), 13 м – 32 шт. (19,63 %), 14 м – 16 шт. (9,82 %), 15 м – 1 шт. (0,61 %). Максимум отмечен для деревьев с высотой 6 и 13 м. График соответствует симметричной параболе, что характерно для однородных насаждений, где высота деревьев изменяется не только по ступеням толщины, но и внутри ступеней.

Для 4-й повторности всего наблюдений – 173. Деревьев с высотой 6 м – 46 шт. (26,59 %), 7 м – 5 шт. (2,89 %), 8 м – 41 шт. (23,70 %), 9 м – 2 шт. (1,16 %), 10 м – 34 шт. (19,65 %), 11 м – 12 шт. (6,94 %), 12 м – 15 шт. (8,67 %), 13 м – 8 шт. (4,62 %), 14 м – 5 шт. (2,89 %), 16 м – 4 шт. (2,31 %), 30 м – 1 шт. (0,58 %). Максимум соответствует деревьям с высотой 6, 8 и 10 м. График представляет собой биномиальную параболу, что характерно для сложных разновозрастных насаждений.

Полученные данные о высоте и диаметре были статистически обработаны с подсчетом t-критерия Стьюдента (табл. 2). При ожидаемом теоретическом значении 1,976 фактическое t-значение в обоих случаях было больше, что свидетельствует о достоверности результатов.

Таблица 2

Сравнение средних высоты и диаметра *Fraxinus excelsior* L.
в полегающей полосе (2-я повторность)
Comparison of the average height and diameter of *Fraxinus excelsior* L.
in the protective forest belt (2nd replication)

Показатель	Среднее	Стандартное отклонение	Ошибка стандартного отклонения	Ожидаемое среднее	t-значение
Высота, м	10,08	2,89	0,23	1,98	35,71
Диаметр, см	21,01	9,26	0,72	1,98	26,22

Примечание: $p = 0,05$; $t_{теор} = 1,976$; $f = 150$.

Влияние лесополос на биометрические параметры озимой пшеницы сорта Алексеевич изучено под воздействием 2 профилей полегающей полосы в 2024 г. Средняя высота *F. excelsior* L. к этому году была от 15,6 до 17,1 м.

Первый профиль – древостой в верхнем ярусе лесополосы практически выпал (преимущественно III класс Крафта и усохшие деревья), и конструкция с ажурно-продуваемой сменилась на плотную – преимущественно за счет кустарникового яруса (рис. 4).

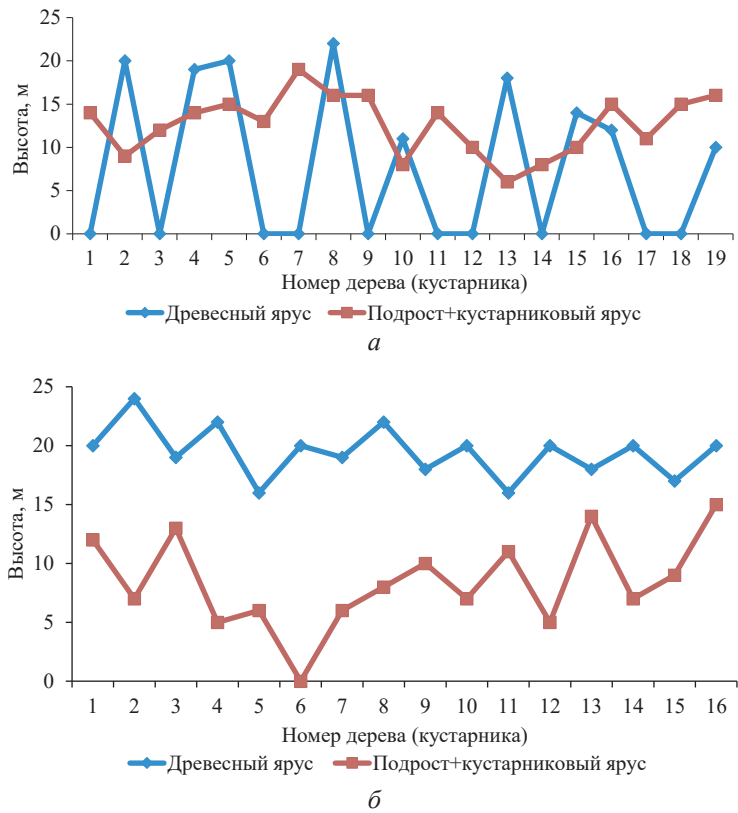


Рис. 4. Профиль лесополосы в верхнем ярусе: а – без древостоя; б – с древостоем
Fig. 4. Profile of a forest belt in the upper layer: а – without a stand; б – with a stand

Древесных пород в верхнем ярусе насчитывается не более 6 шт. Среди них 5 деревьев – сухостой прошлых лет, 2 дерева – III класс Крафта, 2 дерева – I класс Крафта. Средний диаметр *F. excelsior* L. для профиля без древостоя составляет $24,6 \pm 0,21$ см, а средняя высота – $14,0 \pm 0,15$ м.

Высота древесного яруса изменяется не плавно, а скачкообразно от 10 до 22 м, а высота подроста+кустарникового яруса – от 6 до 16 м. Там, где деревьев нет или они усохли, наблюдается максимальная высота подроста и кустарникового яруса.

Второй профиль – древостой в верхнем ярусе лесополосы. Он представлен деревьями I, II и III классов Крафта и сухостоем прошлых лет. Среди них 6 деревьев – сухостой прошлых лет, 6 деревьев – I класс Крафта, 5 деревьев – II и III классы Крафта. Средний диаметр *F. excelsior* L. для профиля с древостоем в верхнем ярусе составляет $25,4 \pm 0,27$ см, а средняя высота – $14,3 \pm 0,19$ м.

Следует отметить, что высоты древостоя и подроста+кустарникового яруса почти накладываются друг на друга, особенно в 1-й половине графика. Высота древесного яруса изменяется от 16 до 24 м, а высота подроста+кустарникового яруса – от 5 до 15 м. Именно в этом профиле отмечен участок без кустарникового яруса.

Влияние полезащитных лесополос на биометрические показатели озимой пшеницы в первую очередь сказываются на высоте надземной части растения. По мере удаления от лесополосы эти показатели уменьшаются как для первого, так и для второго профиля, однако зона влияния у них разная.

Высота надземной части озимой пшеницы под воздействием профиля лесополосы без древостоя в верхнем ярусе в депрессионной зоне изменялась следующим образом: на расстоянии 5 м от лесополосы составила $48,36 \pm 1,14$ см, 10 м от лесополосы – $40,72$ см, 15 м от лесополосы – $37,73 \pm 1,09$ см, а на расстоянии 1Н – $34,75 \pm 1,12$ см. Анализ полученных данных позволил выявить, что по мере удаления от лесополосы высота надземной части растения сначала изменялась резко на 7,64 см, а достигнув максимума снижения скорости ветра (10 м от лесополосы) стала уменьшаться медленно с интервалами от 2,99 см (15 м) до 2,98 см (20 м). Дальность влияния лесополосы без древостоя в верхнем ярусе не превышала 5–10 м. Несмотря на максимальную прибавку урожая в зоне 5–10 м от лесополосы средний урожай на защищенной территории в 2021 г. составил 35,42 ц/га, в 2022 г. – 24,89 ц/га, в 2023 г. – 33,11 ц/га, в 2024 г. – 12,39 ц/га. Резкое снижение урожайности озимой пшеницы в 2024 г. обусловлено неблагоприятными погодно-климатическими условиями – засухой.

Под влиянием лесополосы без древостоя в верхнем ярусе в непосредственной близости от лесополосы (5 м) наблюдалось снижение длины колоса, она составила $5,08 \pm 0,10$ см, при этом количество зерновок в колосе было $15 \pm 0,68$ шт. На расстоянии 15–20 м от лесополосы отмечено уменьшение длины колоса от 4,21 см (15 м от лесополосы) до 4,62 см (20 м).

На расстоянии 5 м от лесополосы под влиянием лесополосы с древостоем в верхнем ярусе высота надземной части озимой пшеницы составляет $67,10 \pm 1,54$ см, что в 1,4 раза больше, чем для профиля без древесного яруса.

На данном поле отсутствовал краевой эффект лесополосы, т. к. оно опажено с двух сторон, а с двух других сторон проходят грунтовые дороги. В зоне лесополосы на расстоянии не более 10 м складываются благоприятные условия для накопления гумуса, т. к. в почву поступают органические вещества в виде опада листьев и веток. Кроме того, поле имеет общий уклон в сторону лесополосы, что влияет на направление движения воды и ее накопление в депрессионной зоне.

При удалении от лесополосы на расстояние 10 м наблюдается уменьшение высоты надземной части пшеницы до $58,39 \pm 1,80$ см, а на расстоянии 15 м – до $47,0 \pm 0,93$ см. Максимум снижения скорости ветра наблюдается на расстоянии 15 м от лесополосы. В зоне влияния лесополосы (5–15 м) уменьшение высоты надземной части растения составляет от 67,10 до 47,00 см, а дальше наблюдается незначительное падение показателя – на 3,79 см (20 м). Лесополоса оказывает наибольшее влияние на расстоянии 5–15 м. В депрессионной зоне (5–10 м от лесополосы) длина колоса изменяется от $6,38 \pm 0,11$ до $6,11 \pm 0,16$ см, а при удаленности от лесополосы на 10–15 м – от $5,59 \pm 0,11$ до $5,11 \pm 0,13$ см.

Выводы

1. При наличии сильно разросшегося кустарникового яруса, подроста и ослаблении конкуренции между деревьями главного яруса средний диаметр *Fraxinus excelsior* L. наибольший – $21,6 \pm 0,60$ и $20,6 \pm 0,69$ см для 1-й и 2-й повторностей соответственно. При наличии конкуренции между деревьями и уменьшении доли кустарника средний диаметр составляет $17,9 \pm 0,59$ см (3-я повторность) и $13,7 \pm 0,53$ см (4-я повторность). Наибольшая средняя высота *F. excelsior* L. выявлена во 2-й повторности – $9,9 \pm 0,23$ м, где средний ярус образован из *Acer tataricum* L. и *Prunus mahaleb* L., которые при уменьшении доли главной породы в верхнем ярусе конкурируют с ней за свет.

2. При наличии *Quercus robur* L. и *F. excelsior* L. в верхнем ярусе достаточно сопутствующей породы (*A. tataricum* L.) и кустарниковой породы (*Lonicerа tatarica* L.). Это доказывает, что продуваемая и ажурно-продуваемая конструкции лесополос в степной зоне обеспечивают лучшее накопление влаги и дают прибавку в урожае, а непродуваемая конструкция лесополосы с недостаточно сформированным верхним ярусом оказывает противоположный эффект.

3. В результате ослабления санитарного состояния деревьев *F. excelsior* L. вследствие погодных условий и повреждения ясеневой златкой высота деревьев вида в 2024 г. изменялась от 15,6 до 17,1 м. Эти показатели не соответствуют средней высоте *F. excelsior* L. при 70-летнем возрасте полезащитной полосы.

4. По мере удаления от лесополосы продуктивность озимой пшеницы повышается: без древостоя – на расстоянии 5–10 м от лесополосы, а с древостоем – 5–15 м. На дальность действия лесополосы в степной зоне наибольшее влияние оказывает сохранность древостоя в верхнем ярусе. В связи с чем для восстановления лесозащитной функции лесополосы рекомендуем провести рубки ухода, а именно уменьшить густоту насаждения за счет частичного удаления кустарника и сопутствующей породы. Кроме того, необходимы мероприятия по сохранению самосева и подроста *F. excelsior* L. и *Q. robur* L.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абакумова Л.И. Причины формирования депрессионной зоны в агроценозах степи // Проблемы природоохранной организации ландшафтов: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Новочеркасск: Лик, 2015. С. 3–7.

Abakumova L.I. The Reasons for Depression Zone Formation in Agricultural Plant Communities of Steppe. *Issues in Landscape Conservation Planning: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Novocherkassk, Lik Publ., 2015, pp. 3–7. (In Russ.).

2. Годунов С.И., Годунова Е.И. Состояние зоны депрессии защитных лесных полос в зависимости от конструкции // Вестн. ставропольск. гос. ун-та. 2008. № 57. С. 55–60.

Godunov S.I., Godunova E.I. The State of the Depression Zone of Forest Shelter Belts Depending on Their Design. *Science. Innovations. Technologies*, 2008, no. 57, pp. 55–60. (In Russ.).

3. Грибачева О.В., Сотников Д.В., Черская Н.А. Влияние полезащитных лесополос и сорной растительности на урожайность озимой пшеницы в ГУП ЛНР «Агрофонд» // Вестн. аграр. науки. 2022. № 2(95). С. 12–18.

Gribacheva O.V., Sotnikov D.V., Cherskaya N.A. Influence of Field-Protective Forest Belts and Weeds on the Yield of Winter Wheat in SUE LPR “Agrofond”. *Bulletin of Agrarian Science*, 2022, vol. 2(95), pp. 12–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.2.12>

4. Киселева К.В., Майоров С.Р., Новиков В.С. Определитель деревьев и кустарников. Средняя полоса России. М.: Фитон XXI, 2020. 228 с.

Kiseleva K.V., Mayorov S.R., Novikov V.S. A Guide to Trees and Shrubs: Central Russia. Moscow, Pryton XXI Publ., 2020. 228 p. (In Russ.).

5. Кулик К.Н., Манаенков А.С., Раков А.Ю., Нетребенко В.Г., Алентьев Н. Полезащитное лесоразведение: значение, состояние, пути выхода из кризиса // Вестн. Рос. акад. с.-х. наук. 2012. № 1. С. 24–27.

Kulik K.N., Manayenkov A.S., Rakov A.Yu., Netrebenko V.G., Alentyev N. Field-Protecting Forestation: Significance, State of the Art Ways for Recovery from Crisis. *Vestnik of the Russian agricultural science*, 2012, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.).

6. Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Попов В.С. Влияние полезащитных лесных полос на развитие яровой пшеницы в приопушечной зоне посевов // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 5.: Геогр. 2023. Т. 78, № 4. С. 97–106.

Manayenkov A.S., Podgaetskaya P.M., Popov V.S. Impact of Forest Shelter Belts on the Development of Spring Wheat in the Near-Edge Zone of Crops. *Lomonosov Geography Journal*, 2023, vol. 4, pp. 97–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.9>

7. Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов / под ред. Е.С. Павловского и М.И. Долгилевича. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.

Methods of Systemic Research on Forest-Agricultural Landscapes. Ed. by E.S. Pavlovskiy, M.I. Dolgilevich. Moscow, VASKhNIL Publ., 1985. 112 p. (In Russ.).

8. Михин В.И., Михина Е.А., Михин Д.В. Роль полезащитных насаждений в преобразовании ландшафтов Центрального Черноземья // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 4(20). С. 43–50.

Mikhin V.I., Mikhina E.A., Mikhin D.V. The Role of Shelter Spaces in the Transformation Landscapes of Central Chernozem Region. *Forestry Engineering Journal*, 2015, vol. 5, no. 4(20), pp. 43–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/17401>

9. Сарычев А.Н., Костин М.В., Плескачев Ю.Н. Влияние защитных лесных насаждений и приемов обработки почвы на агрофизические свойства каштановых почв и урожайность сельскохозяйственных культур // Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 6. С. 63–70.

Sarychev A.N., Kostin M.V., Pleskachev Yu.N. Protective Forest Plantations and Treatment Methods Influence on Agrophysical Properties of Chestnut Soil and Agricultural Yield. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 63–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-63-70>

10. Сучков Д.К. Технология выращивания полезащитных лесных полос в сухостепной и полупустынной зонах // Науч.-агроном. журн. 2019. № 3(106). С. 7–10.

Suchkov D.K. Technology of Cultivation of Protective Forest Strips in Dry-Steppe and Semi-Desert Zones. *Scientific agronomy journal*, 2019, no. 3(106), pp. 7–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.34736/FNC.2019.106.3.002>

11. Тунякин В.Д., Рыбалкина Н.В., Шенишин Л.М. Лесообразовательный процесс в предельно узкой полезащитной лесной полосе // Лесотехн. журн. 2022. Т. 12, № 2(46). С. 56–67.

Tunyakin V.D., Rybalkina N.V., Shenshin L.M. Forest Formation Process in Extremely Narrow Forest Shelter Belt. *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forest Engineering journal, 2022, vol. 12, no. 2(46), pp. 56–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/5>

12. Турусов В.И. Научное наследие В.В. Докучаева и его роль в развитии земледелия // Сб. науч. докл. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 125-летию организации «Особой экспедиции лесного департамента по испытанию и учету различных способов и приемов лесного и водного хозяйства в степях южной России». Воронеж: Истоки, 2017. С. 3–14.

Tursov V.I. The Scientific Legacy of V.V. Dokuchaev and Its Role in the Development of Agriculture. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 125th anniversary of the organization "Special Expedition of the Forestry Department for Testing and Recording Various Methods and Techniques of Forestry and Water Management in the Steppes of Southern Russia"*. Voronezh, Istoki Publ., 2017, pp. 3–14. (In Russ.).

13. Чернодубов А.И. Культуры ясеня обыкновенного // Современ. проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 391.

Chernodubov A.I. Culture *Fraxinus excelsior* L. *Modern problems of science and education*, 2012, no. 3, p. 391. (In Russ.).

14. Elevitch C.R., Mazaroli N.D., Ragone D. Agroforestry Standards for Regenerative Agriculture. *Sustainability*, 2018, vol. 10(9), art. 3337. <https://doi.org/10.3390/su10093337>

15. Garrity D.P. Agroforestry and the Achievement of the Millennium Development Goals. *Agroforestry Systems*, 2004, vol. 61, pp. 5–17. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028986.37502.7c>

16. Hillbrand A., Borelli A., Conigliaro M., Olivier A. *Agroforestry for Landscape Restoration*. Rome, FAO, 2017. 22 p.

17. Jansons J., Zālītis P., Actiņš A. The Structure and Thinning Requirements for Broadleaved Stands of Natural Origin in Latvia. *Baltic Forestry*, 2011, vol. 17(2), pp. 95–100.

18. Wu T., Zhang P., Zhang L., Wang J., Yu M., Zhou X., et al. Relationships Between Shelter Effects and Optical Porosity: A Meta-Analysis for Tree Windbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 259, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.013>

19. Zhoua X.H., Brandle J.R., Takle E.S., Mized C.W. Estimation of the Three-Dimensional Aerodynamic Structure of a Green Ash Shelterbelt. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, vol. 111, iss. 2, pp. 93–108. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00017-5)

20. Zomer R.J., Trabucco A., Coe R., Place F. *Trees on Farms: Analysis of the Global Extent and Geographical Patterns of Agroforestry*. ICRAF Working Paper no. 89. Nairobi, Kenya, World Agroforestry Centre, 2009. 64 p. <https://doi.org/10.5716/WP16263.PDF>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares no conflict of interest

Краткое сообщение

УДК 630*165.61/630*232.31

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-3-205-213

Формовое разнообразие ели в северной подзоне тайги Архангельской области

Э.А. Генрих[✉], аспирант; ResearcherID: [PKR-9995-2026](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9085-4365>

Е.А. Беляева, соискатель; ResearcherID: [JMR-4281-2023](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1388-6252>

Д.В. Лешуков, аспирант; ResearcherID: [PMF-5915-2026](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3035-695X>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; genrih.edvard@yandex.ru[✉], belyaeva.e1@edu.narfu.ru, anshukov2017@gmail.com

Поступила в редакцию 06.04.25 / Одобрена после рецензирования 12.06.25 / Принята к печати 14.06.25

Аннотация. Изучение формового разнообразия древесных растений представляет значительный научный и практический интерес для селекции и лесовосстановления. Актуальность работы обусловлена процессами интрогрессивной гибридизации елей европейской (*Picea abies* (L.) Karst) и сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в Архангельской области, а также малой изученностью данного вопроса для северотаежных фитоценозов региона. Цель исследования – изучение формового разнообразия ели в условиях северной подзоны тайги Архангельской области. Маршрутные исследования проводили в сентябре 2025 г. в ельниках черничных Лешуконского района Архангельской области. Показано, что в изученных популяциях доминирующее положение занимает типичная ель сибирская (58,8 %), доля встречаемости гибридной ели с преобладанием признаков ели сибирской составляет 41,2 %. Обнаружено 3 типа ветвления кроны: компактный (51 %), щетковидный (27,5 %), плосковетвистый (25,5 %). Выявлены достоверные различия на 95%-м уровне значимости для массы, длины и диаметра шишек между 2 фенотипами и типами ветвления кроны ели. Почти отсутствуют статистически значимые различия длины, ширины и длины наружных окончаний семенных чешуй ели сибирской и гибридной формы. Наилучшие биометрические параметры шишек характерны для ели сибирской и гибридной формы с щетковидным типом ветвления кроны. Анализ изменчивости показал, что масса шишек варьирует на низком и среднем уровнях, а длина и диаметр – на очень низком и низком. Полученные данные расширяют сведения о видовом и формовом составе северотаежных фитоценозов, могут быть использованы для селекционных работ и повышения эффективности лесохозяйственных мероприятий.

Ключевые слова: ель сибирская, интрогрессивная гибридизация, шишки, тип ветвления кроны, изменчивость биометрических признаков, северная подзона тайги, Архангельская область

Для цитирования: Генрих Э.А., Беляева Е.А., Лешуков Д.В. Формовое разнообразие ели в северной подзоне тайги Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 3. С. 205–213. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-205-213>



Brief report

Spruce Morphological Diversity in the Northern Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region

Edward A. Genrikh[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [PKR-9995-2026](https://orcid.org/0000-0001-9085-4365),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9085-4365>

Elizaveta A. Belyaeva, External PhD Student; ResearcherID: [JMR-4281-2023](https://orcid.org/0009-0006-1388-6252),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1388-6252>

Dmitriy V. Leshukov, Postgraduate Student; ResearcherID: [PMF-5915-2026](https://orcid.org/0009-0009-3035-695X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3035-695X>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002; genrikh.edvard@yandex.ru[✉], belyaeva.e1@edu.narfu.ru, anshukov2017@gmail.com

Received on April 6, 2025 / Approved after reviewing on June 12, 2025 / Accepted on June 14, 2025

Abstract. The study of morphological diversity in woody plants is of considerable scientific and practical interest for breeding and reforestation. The relevance of this work is due to the introgressive hybridisation of European spruce (*Picea abies* (L.) Karst) and Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in the Arkhangelsk Region, as well as the lack of research on this issue in the region's northern taiga plant communities. The research aims at studying the morphological diversity of spruce in the northern taiga subzone in the Arkhangelsk Region. Field studies were carried out in September 2025 in spruce-blueberry forests in the Leshukonskiy District of the region. The studies showed that the typical Siberian spruce (58.8 %) dominates in the studied populations, while hybrid spruce with predominantly Siberian spruce characteristics accounts for 41.2 % of the total. Three crown branching patterns were found: dense (51 %), brush-like (27.5 %), and flat-branched (25.5 %). Significant differences at the 95 % significance level were found for cone weight, length, and diameter between the two phenotypes and spruce crown branching patterns. There are hardly any statistically significant differences in the parameters of seed scales (length, width, length of outer ends) between Siberian spruce and hybrids. The best biometric parameters of cones are typical for Siberian spruce cones and hybrid cones with brush-like crown branching. Analysis of variability showed that cone weight varies at a low and medium level, while length and diameter vary at a very low and low level. The data obtained expand our knowledge of the species and form composition of northern taiga phytocenoses and can be used for breeding activities and to improve the effectiveness of forest management measures.

Keywords: Siberian spruce, introgressive hybridization, cones, crown branching pattern, biometric traits variability, taiga northern subzone, Arkhangelsk region

For citation: Genrikh E.A., Belyaeva E.A., Leshukov D.V. Spruce Morphological Diversity in the Northern Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 3, pp. 205–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-3-205-213>

Введение

Вопрос изучения формового разнообразия древесных растений давно привлекает внимание исследователей, наибольший интерес к данной пробле-



матике пришелся на 70–80-е гг. прошлого столетия [3, 11, 15, 16, 21, 23], после чего количество работ по этой теме несколько снизилось в 90-е гг. На сегодняшний день определение формового разнообразия остается актуальным не только для науки, но и в целях сохранения генетического разнообразия и разработки рекомендаций для проведения селекционных работ и лесоразведения [1, 2, 4, 7, 13, 18, 22, 25–28].

На территории Архангельской области протекает процесс интрогрессивной гибридизации ели с образованием елями европейской и сибирской множества гибридных форм [1–4, 10, 19, 20]. Кроме того, еловые леса в Архангельской области имеют сложный формовой состав, исследователями выделяются несколько типов ветвления кроны [1, 4, 10, 19].

Основным отличительным признаком ели европейской и ели сибирской является форма семенных чешуй [16]. В районах соприкосновения ареалов двух этих видов отмечается высокая изменчивость наружного края семенных чешуй [14, 16].

Разнообразие формовых признаков ели и степени гибридизации в северной подзоне тайги Архангельской области в настоящий момент остается малоизученным. Кроме научного интереса, сведения о размерах шишек имеют хозяйственную ценность, поскольку длина шишек связана с количеством семян [9, 13–15].

Цель исследования – изучение формового разнообразия ели в условиях северной подзоны тайги Архангельской области.

Объекты и методы исследования

Изучены популяции ели естественного происхождения на территории Лешуконского района Архангельской области. Сбор материала проводили в сентябре 2025 г. Исследованное насаждение по типу является ельником-черничником, такой выбор объекта обусловлен наибольшим распространением данного типа леса в Архангельской области и на Европейском Севере России [6, 17, 20].

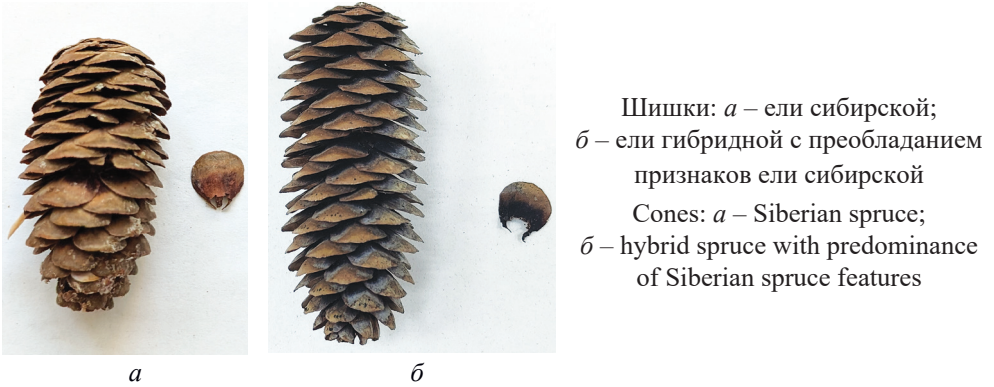
В основу исследования был положен маршрутный метод. Шишки ели при их наличии собирались через каждые 100 м в количестве не менее 15 шт., отмечались тип леса и форма ветвления кроны. В ходе маршрутных исследований заложено 30 точек, на каждой точке сбор шишек производился с 1–2 экземпляров ели, в сумме собрано 455 шишек с 85 деревьев. Протяженность каждого маршрута составляла около 10 км. Для определения типа ветвления кроны использовалась классификация Н.А. Юрре [24]. В лабораторных условиях на электронных весах измерялась масса собранных шишек с точностью до 0,01. Длина и диаметр шишек устанавливались электронным штангенциркулем с точностью 0,01 мм.

Для определения фенотипа ели была использована методика Л.Ф. Правдина [16] и диагностические признаки, приведенные в работе И.А. Коренева [5]. Для выполнения измерений из середины шишки отбирали несколько семенных чешуй и с помощью штангенциркуля фиксировали длину, ширину и длину наружного края семенных чешуй, полученные значения переводили в баллы [5, 12, 13]. С помощью шаблонов [5] были определены формы и углы заострения семенных чешуй.

Статистический анализ данных проведен в программе Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам маршрутных исследований и комплексной оценки биометрических параметров шишек установлено наличие 2 фенотипов ели – ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской (см. рисунок). В изученных ельниках-черничниках доминирующее положение по встречаемости занимает типичная ель сибирская (58,8 %), ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской распространена в меньшей степени (41,2 %).



Обнаружено 3 типа ветвления кроны: компактный (51 %), щетковидный (27,5 %), плосковетвистый (25,5 %). У ели сибирской соотношение форм ветвления следующее: компактный (46,7 %), щетковидный (30,0 %), плосковетвистый (23,3 %); у ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской: компактный (38,1 %), щетковидный (33,3 %), плосковетвистый (28,6 %).

Основные биометрические параметры шишек и семенных чешуй ели представлены в табл. 1. Наибольшими массой, длиной, диаметром шишек характеризуется ель сибирская и гибридная с преобладанием признаков ели сибирской со щетковидным типом ветвления кроны. Наименьшие биометрические показатели шишек характерны для компактного типа ветвления внутри каждого фенотипа.

Таблица 1

Морфометрические признаки шишек и семенных чешуй ели с различным типом ветвления
Morphometric features of cones and seed scales of spruce with different branching patterns

Тип ветвления	Масса, г	Признаки шишек, мм		Признаки семенных чешуй, мм		
		длина	диаметр	длина	ширина	длина наружных окончаний
Ель сибирская						
Щетковидный	12,5±0,2	70,4±0,8	22,6±0,2	13,5±0,3	13,0±0,3	3,2±0,1
Компактный	9,3±0,4	59,4±1,3	21,3±0,4	13,2±0,2	13,2±0,2	3,3±0,1
Плосковетви- стый	10,2±0,4	62,7±1,7	22,3±0,5	13,2±0,2	13,2±0,3	3,5±0,2
Ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской						
Щетковидный	12,2±0,2	70,2±1,4	22,3±0,2	14,1±0,3	14,0±0,2	3,4±0,1
Компактный	9,7±0,3	60,2±0,9	21,3±0,4	13,4±0,2	13,5±0,4	3,3±0,3
Плосковетви- стый	10,7±0,3	64,5±1,4	21,8±0,5	13,8±0,4	13,8±0,2	3,8±0,2

Морфометрические параметры семенных чешуй (длина, ширина и длина наружных окончаний) внутри вида практически не имеют различий в зависимости от типа ветвления.

Анализ по критерию Стьюдента показал достоверное различие на 95%-м уровне значимости по основным биометрическим параметрам шишек между 2 типами ветвления – щетковидным и компактным – как внутри фенотипа, так и в сравнении между ними (табл. 2). Практически во всех случаях доказана разница массы и длины шишек в зависимости от видовой принадлежности и типа ветвления кроны ели.

Таблица 2

Показатель различия (t) для видов ели с разным типом ветвления кроны по параметрам шишек и семенных чешуй, P = 0,05
The difference index (t) for spruce species with different branching patterns according to the parameters of cones and seed scales, P = 0.05

Вид ели (тип ветвления кроны)	t ₀₀₅	Масса	Признаки шишек		Признаки семенных чешуй		
			длина	диаметр	длина	ширина	длина наружных окончаний
Ель сибирская (Щ) – ель сибирская (К)	2,04	6,84	7,30	2,62	0,89	0,58	0,84
Ель сибирская (Щ) – ель сибирская (П)	2,04	6,13	4,61	0,03	0,84	0,29	1,37
Ель сибирская (К) – ель сибирская (П)	2,04	2,25	2,58	1,94	0,16	0,22	0,69
Ель гибридная* (Щ) – ель гибридная* (К)	2,16	6,90	5,91	2,40	1,98	1,03	0,07
Ель гибридная* (Щ) – ель гибридная* (К)	2,22	4,66	2,85	1,01	0,72	0,67	1,71
Ель гибридная* (К) – ель гибридная* (П)	2,18	2,28	2,52	0,81	0,67	0,52	1,22
Ель сибирская (Щ) – ель гибридная* (К)	2,06	7,71	8,32	2,90	0,10	1,10	0,62
Ель сибирская (Щ) – ель гибридная* (П)	2,07	5,56	3,63	1,47	0,57	2,02	2,44
Ель сибирская (К) – ель гибридная* (П)	2,07	2,65	2,65	0,71	1,24	1,97	1,77
Ель сибирская (К) – ель гибридная* (Щ)	2,06	6,20	5,67	2,13	2,77	2,84	0,44
Ель сибирская (П) – ель гибридная* (Щ)	2,10	5,24	3,44	0,48	2,34	2,34	0,49
Ель сибирская (П) – ель гибридная* (К)	2,11	1,80	2,46	2,09	0,84	0,85	0,36

Примечание: Щ – щетковидный тип ветвления; К – компактный; П – плосковетвистый. *Ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской. Полужирным шрифтом отмечены достоверные различия.

Достоверные различия по длине и ширине семенных чешуй наблюдаются между елью сибирской и гибридной формой при сравнении щетковидного типа ветвления кроны с компактным и плосковетвистым типами. Длина наружных чешуй существенно различается для ели сибирской с щетковидным типом ветвления кроны и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской с плосковетвистым типом ветвления. Не отмечены статистически значимые различия

по 3 параметрам семенных чешуй между двумя фенотипами ели с различными типами ветвления.

Коэффициент вариации используется для измерения изменчивости изучаемых параметров в рамках популяции. Высокий уровень изменчивости свидетельствует о более высоком генетическом разнообразии. Для оценки уровня изменчивости биометрических признаков использовали шкалу С.А. Мамаева [8].

Масса шишек по всем типам ветвления варьирует на низком уровне, за исключением шишек ели сибирской с компактным типом ветвления, для которых характерен средний уровень (табл. 3). Длина, диаметр шишек 2 фенотипов ели по всем типам ветвления кроны флуктуирует на очень низком и низком уровнях. Наиболее варьирующим признаком среди морфометрических параметров оказалась длина наружных окончаний семенных чешуй. Так, у елей сибирской и гибридной с преобладанием признаков ели сибирской компактного и плосковетвистого типов ветвления кроны данный признак изменяется на среднем уровне. Полученные данные согласуются с результатами исследований в ельниках Вологодской области [18].

Таблица 3

Коэффициент вариации, %, для биометрических показателей шишек и семенных чешуй
Coefficient of variation, %, for biometric parameters of cones and seed scales

Тип ветвления	Масса	Признаки шишек		Признаки семенных чешуй		
		длина	диаметр	длина	ширина	длина наружных окончаний
Ель сибирская						
Щетковидный	5,5	4,7	4,5	8,8	9,7	10,8
Компактный	20,5	9,4	8,7	6,9	5,4	17,2
Плосковетвистый	9,8	6,6	7,9	9,4	8,1	20,5
Ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской						
Щетковидный	3,5	5,3	2,4	5,3	4,3	4,5
Компактный	9,4	4,4	5,2	4,5	2,8	22,3
Плосковетвистый	6,5	5,4	5,6	7,8	4,3	15,1

Заключение

Таким образом, полученные результаты расширяют представления о формовом разнообразии ели в северной подзоне тайги Архангельской области и подтверждают сохранение выраженной роли ели сибирской в формировании еловых древостоев. Практическая значимость работы заключается в возможности использования выявленных закономерностей при проведении лесосеменного районирования, отборе плюсовых деревьев и при осуществлении селекционно-генетических мероприятий, направленных на сохранение и рациональное использование лесных ресурсов в условиях северотаежной зоны Архангельской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Комарова А.М., Соколова Е.Б. Формы ели и их лесосеменное значение // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 4. С. 22–28.
Babich N.A., Komarova A.M., Sokolova E.B. Spruce Forms and Their Seed Relevance. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2010, no. 4, pp. 22–28. (In Russ.).

2. Генрих Э.А., Залывская О.С., Беляева Е.А., Борисов Д.С. Полиморфизм ели европейской и ели сибирской в условиях Субарктики // Хвойные бореал. зоны. 2025. Т. 43, № 6. С. 7–14.

Genrikh E.A., Zalyvskaya O.S., Belyaeva E.A., Borisov D.S. Polymorphism European Spruce of and Siberian Spruce in Subarctic Conditions. *Conifers of the boreal area*, 2025, vol. 43, no. 6, pp. 7–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.64430/1993-0135-2025-6-7-14>

3. Долголиков В.И., Осмина Р.Ф. Встречаемость и продуктивность различных форм ели в Ленинградской области // Восстановление леса на Северо-Западе РСФСР. Л.: ЛенНИИЛХ, 1978. С. 111–116.

Dolgolikhov V.I., Osmina R.F. Frequency and Productivity of Various Forms of Spruce in the Leningrad Region. *Forest Regeneration in the Northwest of the Russian Soviet Federative Socialist Republic*. Leningrad, LenNNILKh Publ., 1978, pp. 111–116. (In Russ.).

4. Ежов А.В., Юдина О.А. Формовое разнообразие географических культур ели на Европейском Севере России (Архангельская область) // Успехи современного естествознания. 2022. № 2. С. 7–13.

Ezhov A.V., Yudina O.A. A Form Variety Coniferous in the European North of Russia (Arkhangelsk Region). *Advances in current natural sciences*, 2022, no. 2, pp. 7–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37771>

5. Корнев И.А. Продуктивность ели в связи с морфологической изменчивостью вида в подзоне южной тайги: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2008. 22 с.

Korenev I.A. *Productivity of Spruce in Connection with the Morphological Variability of the Species in the Southern Taiga Subzone*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2008. 22 p. (In Russ.).

6. Крышень А.М., Геникова Н.В., Преснухин Ю.В. Ряды восстановления ельников черничных Восточной Фенноскандии // Ботан. журн. 2021. Т. 106, № 2. С. 107–125.

Kryshen A.M., Genikova N.V., Presnukhin Yu.V. Reforestation Series of Bilberry Spruce Forests in Eastern Fennoscandia. *Botanicheskii Zhurnal*, 2021, vol. 106, no. 2, pp. 107–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0006813621020071>

7. Макаров Ю.И. Особенности роста и развития ели обыкновенной под влиянием внутривидового полиморфизма // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 87–97.

Makarov Yu.I. Fir Spruce Growth and Development Under the Influence of Intraspecific Polymorphism. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2016, no. 3, pp. 87–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.87>

8. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 284 с.

Mamaev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p. (In Russ.).

9. Молчанов А.А. География плодоношения главнейших древесных пород. М.: Наука, 1967. 103 с.

Molchanov A.A. *Geography of Fruiting of the Major Tree Species*. Moscow, Nauka Publ., 1967, 103 p. (In Russ.).

10. Мосеев Д.С. Формы ветвления ели в различных типах леса Архангельской области и связь с ними некоторых биометрических показателей // Экологич. проблемы Севера. 2005. Вып. 8. С. 54–56.

Moseev D.S. Branching Patterns of Spruce in Various Forest Types of the Arkhangelsk Region and Their Relationship to Certain Biometric Indicators. *Ekologicheskiye problemy Severa*, 2005, iss. 8, pp. 54–56. (In Russ.).

11. Попов В.Я. Формы ели в продуктивных типах леса северной и средней подзона тайги и их лесохозяйственное значение // Материалы отчетной сессии лаборатории лесоведения за 1968 год. Архангельск, 1969. С. 45–47.

Popov V.Ya. Spruce Forms in Productive Forest Types of the Northern and Middle Taiga Subzones and Their Significance for Forestry. *Proceedings of the 1968 Annual Session of the Forestry Laboratory*. Arkhangelsk, 1969, pp. 45–47. (In Russ.).

12. Попов П., Александров А., Недкова Е. Географическая изменчивость и фенотипическая структура популяций ели обыкновенной по форме семенных чешуй // Наука за гората. 2015. Кн. 2. С. 3–16.

Popov P., Alexandrov A., Nedkova E. Geographical Variability and Phenotypic Structure of Norway Spruce Populations in the Form of Seed Scales. *Nauka za gorata* = Forest science, 2015, book 2, pp. 3–16. (In Russ.).

13. Попов П.П. Ель на востоке Европы и в Западной Сибири: популяционно географическая изменчивость и ее лесоводственное значение: моногр. Новосибирск: Наука, 1999. 169 с.

Popov P.P. *Spruce in Eastern Europe and Western Siberia: Population and Geographical Variability and Its Significance for Forestry*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 169 p. (In Russ.).

14. Попов П.П. Ель европейская и сибирская: структура, интеграция и дифференциация популяционных систем. Новосибирск: Наука, 2005. 231 с.

Popov P.P. *European and Siberian Spruce: Structure, Integration, and Differentiation of Population Systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 231 p. (In Russ.).

15. Попов П.П., Казанцева М.Н., Арефьев С.П. Индивидуальная и географическая изменчивость шишек *Picea obovata* в российской части ареала в связи с количеством семян в них // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 192–199.

Popov P.P., Kazantseva M.N., Arefyev S.P. Individual and Geographic Variability of *Picea obovata* Cones in the Russian Part of Its Area in Relation to the Seeds Quantity in Them. *Theoretical and Applied Ecology*, 2024, no. 3, pp. 192–199. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-192-199>

16. Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 177 с. Pravdin L.F. *European Spruce and Siberian Spruce in the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 177 p. (In Russ.).

17. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Еловые леса России. М.: Наука, 2002. 333 с. Rysin L.P., Savelyeva L.I. *Spruce Forests of Russia*. Moscow, Nauka Publ., 2002. 333 p. (In Russ.).

18. Смирнов А.В., Хамитов Р.С., Корчагов С.А., Грибов С.Е., Щекалев Р.В. Влияние типа условий местопроизрастания и географического положения популяций на степень интрогрессивной гибридизации ели в Вологодской области // Лесохоз. информ. 2020. № 4. С. 94–104.

Smirnov A.V., Khamitov R.S., Korchagov S.A., Gribov S.E., Shchekalev R.V. Impact of a Site Condition Type and Geographic Location of Populations on the Degree of Introgressive Hybridization of Spruce in the Vologda region. *Forestry Information*, 2020, no. 4, pp. 94–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.4.10>

19. Тарханов С.Н., Коровин В.В., Щекалев Р.В. Формовое разнообразие хвойных на Европейском Севере России // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2006. № 5. С. 89–94.

Tarhanov S.N., Korovin V.V., Shchekalev R.V. A Form Variety Coniferous in the European North of Russia. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2006, no. 5, pp. 89–94. (In Russ.).

20. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А. Изменчивость морфоструктурных признаков ели разного возраста в условиях севера Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 56–66.

Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A. Variability of Morphostructural Features of Uneven-Aged Spruce in the North of Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 2, pp. 56–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.56>

21. Чертовской В.Г. Еловые леса европейской части СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 176 с.

Chertovskoy V.G. *Spruce Forests of the European Part of the USSR*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 176 p. (In Russ.).

22. Юдин И.А., Юдина О.А., Наквасина Е.Н. Репродуктивные особенности ели обыкновенной в географических культурах Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 3. С. 19–28.

Yudin I.A., Yudina O.A., Nakvasina E.N. Reproductive Features of Norway Spruce in Geographical Cultures of the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2015, no. 3, pp. 19–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.3.19>

23. Юркевич И.Д., Голод Д.С., Парфенов В.И. Формовой состав ели обыкновенной в лесах Белоруссии // Лесная генетика, селекция и семеноводство. Петрозаводск: Карелия, 1970. С. 184–190.

Yurkevich I.D., Golod D.S., Parfenov V.I. The Morphological Composition of European Spruce in the Forests of Belarus. *Forest Genetics, Breeding, and Seed Production*. Petrozavodsk, Karelia Publ., 1970, pp. 184–190. (In Russ.).

24. Юрпе Н.А. Типы ветвления ели обыкновенной // Лесн. хоз-во. 1939. № 7. С. 30–37.

Yurre N.A. *Branching Patterns of European Spruce*. *Lesnoye khozyaystvo*, 1939, no. 7, pp. 30–37. (In Russ.).

25. Feng S., Ru D., Sun Y., Mao K., Milne R., Liu J. Trans-Lineage Polymorphism and Nonbifurcating Diversification of the Genus *Picea*. *New Phytologist*, 2019, vol. 222, iss. 1, pp. 576–587. <https://doi.org/10.1111/nph.15590>

26. Grahl-Nielsen O., Mjaavatten O., Ovstedal D.O. A Chemometric Comparison Between *Picea abies* and *P. obovata* (Pinaceae) in Norway. *Nordic Journal of Botany*, 2008, vol. 11, no. 6, pp. 613–618. <http://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1991.tb01271.x>

27. Park Y.D., Chang K.S., Jin G.Z., Kim H., Chang C.-S. Cone Morphological Variation of the *Picea jezoensis* Complex in Eastern Asia. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 2010, vol. 99, no. 2, pp. 235–243.

28. Strong W.L., Hills L.V. Taxonomy and Origin of Present-Day Morphometric Variation in *Picea glauca* (*× engelmannii*) Seed-Cone Scales in North America. *Canadian Journal of Botany*, 2006, vol. 84, no. 7, pp. 1129–1141. <http://doi.org/10.1139/b06-071>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

