

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

4

2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Гаврилова О.И., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
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

4

2025

EDITORIAL BOARD:

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- М.Д. Мерзленко, В.А. Брынцев, П.Г. Мельник, А.А. Коженкова.* Лесоводственные особенности деревьев лиственницы европейской разных классов Крафта в лесных культурах..... 9
- М.В. Ермакова.* Особенности выращивания посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесных питомниках Зауралья... 20
- И.Л. Вахнина, Е.В. Носкова, В.С. Мыглан.* Радиальный прирост лиственницы даурской (*Larix dahurica* Turcz.) в условиях Станового нагорья..... 35
- Г.Н. Гордеева.* Биолого-морфологическая характеристика видов рода *Crataegus* L. в дендрарии Хакасии..... 50
- А.Е. Осипенко, С.В. Залесов, К.А. Башегуров.* Эффективность создания культур сосны обыкновенной в сухой степи..... 64
- Н.М. Дебков.* Состояние кедровников на южной границе ареала Западной Сибири 77
- Г.В. Калько, А.Е. Андреев.* Загрязнение хвои ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) тяжелыми металлами в условиях техногенных выбросов..... 91
- Ю.М. Саблирова, Ф.А. Темботова, Р.Х. Пшегусов, Н.Л. Цепкова.* Типологическое и флористическое разнообразие пихтовых насаждений Тебердинского национального парка..... 110

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

- В.И. Посметьев, М.А. Савинков, В.В. Посметьев, А.Ю. Мануковский, В.О. Никонов.* Методика расчета и результаты оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора при агрегатировании с лесными почвообрабатывающими орудиями..... 130
- Р.Ю. Добрецов, С.Б. Добрецова, С.А. Войнаш, В.А. Соколова.* Распределение мощности в трансмиссиях лесных и транспортных колесных машин..... 143
- C. Muthumala, S. De Silva, I. Arunakumara, A. Alwis, F. Marikar.* Assessment of the Impact of Boron Treatment by Impregnation Method on Finger-Jointed Pine (*Pinus caribaea*) Wood..... 154

- А.А. Лычаков, К.Н. Куликов, В.Н. Евгенов, С.В. Лодочников.* Особенности пропитки древесины водорастворимыми защитными средствами.... 164

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

- Р.Г. Сафин, К.В. Валеев, Д.Ф. Зиятдинова.* Экстракция биологически активных веществ из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae ... 173
- В.А. Вешняков, М.Р. Ёкубжанов, И.И. Пиковской, Ю.Г. Хабаров.* Нитрование гидролизного лигнина азотной кислотой в диметилсульфоксиде и воде..... 185



CONTENTS

FORESTRY

<i>M.D. Merzlenko, V.A. Bryntsev, P.G. Melnik, A.A. Kozhenkova.</i> Silvicultural Characteristics of European Larch Trees of Different Kraft Classes in Forest Crops.....	9
<i>M.V. Ermakova.</i> Features of Growing the Planting Material of Scots Pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) in the Forest Nurseries of the Trans-Urals.....	20
<i>I.L. Vakhnina, E.V. Noskova, V.S. Myglan.</i> Radial Increment of Dahurian Larch (<i>Lárix dahúrica</i> Turcz.) in the Conditions of the Stanovoy Highlands	35
<i>G.N. Gordeeva.</i> Biological and Morphological Characteristics of Species of the Genus <i>Crataegus</i> L. in the Arboretum of Khakassia.....	50
<i>A.E. Osipenko, S.V. Zalesov, K.A. Bashegurov.</i> The Efficiency of Creating Scots Pine Crops in Dry Steppe.....	64
<i>N.M. Debkov.</i> The Condition of Siberian Stone Pine Forests on the Southern Border of Western Siberia Range	77
<i>G.V. Kalko, A.E. Andreev.</i> Contamination of Norway Spruce (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.) Needles with Heavy Metals under Conditions of Technogenic Emissions.....	91
<i>Yu.M. Sablirova, F.A. Tembotova, R.Kh. Pshegusov, N.L. Tsepikova.</i> Typological and Floristic Diversity of Fir Stands in the Teberda National Park	110

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

<i>V.I. Posmetyev, M.A. Savinkov, V.V. Posmetyev, A.Yu. Manukovskii, V.O. Nikonov.</i> Calculation Methodology and Results of Optimization of Design Parameters of the Tractor Recuperative Mounted System When Aggregated with Forest Tillage Implements	130
<i>R.Yu. Dobretsov, S.B. Dobretsova, S.A. Voinash, V.A. Sokolova.</i> Power Distribution in Transmissions of Forestry and Transport Wheeled Vehicles.....	143
<i>C. Muthumala, S. De Silva, I. Arunakumara, A. Alwis, F. Marikar.</i> Assessment of the Impact of Boron Treatment by Impregnation Method on Finger-Jointed Pine (<i>Pinus caribaea</i>) Wood.....	154

-
- A.A. Lychakov, K.N. Kulikov, V.N. Evgenov, S.V. Lodochnikov.* Features of Wood Impregnation with Water-Soluble Protective Agents..... 164

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

- R.G. Safin, K.V. Valeev, D.F. Ziatdinova.* Extraction of Biologically Active Substances from the Bark and Leaves of Trees of the Salicaceae Family. 173
- V.A. Veshnyakov, M.R. Yokubjanov, I.I. Pikovskoi, Yu.G. Khabarov.* Nitration of Hydrolysis Lignin with Nitric Acid in Dimethyl Sulfoxide and Water 185



Научная статья

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-9-19

Лесоводственные особенности деревьев лиственницы европейской разных классов Крафта в лесных культурах

М.Д. Мерзленко¹, д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

В.А. Брынцев^{2✉}, д-р с.-х. наук, доц., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

П.Г. Мельник^{1,3}, канд. с.-х. наук, доц., ст. науч. сотр.; ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

А.А. Коженкова², канд. с.-х. наук, доц., науч. сотр.; ResearcherID: [AAN-2228-2021](https://orcid.org/0000-0003-1518-7165),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., Россия, 143030; md.merzlenko@mail.ru, melnik_petr@bk.ru

²Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, ул. Ботаническая, д. 4, Москва, Россия, 127276; bryntsev@mail.ru✉, kozhenkova_anna@mail.ru

³Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; melnik_petr@bk.ru

Поступила в редакцию 23.01.24 / Одобрена после рецензирования 18.04.24 / Принята к печати 21.04.24

Аннотация. Проведено сравнительное изучение лесоводственных особенностей роста деревьев различных классов Крафта в лесных культурах лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.), произрастающих в центре Русской равнины в лесорастительных условиях сосняка-черничника (*Pinetum myrtillosum*). Актуальность работы обусловлена отсутствием подобных исследований для искусственных дендроценозов на протяжении 25 лет. Рассмотрена динамика редуцированных чисел, почвенно-световых приростов и относительных высот деревьев разных классов Крафта на стадии зрелости насаждения (124–149 лет). Установлено, что в возрасте 124, 134 и 149 лет редуцированные числа и относительные высоты строго дифференцированы в разрезе разных классов Крафта и эта особенность сохраняется на протяжении 25 лет. При этом со 124 до 149 лет редуцированные числа и относительные высоты у разных классов Крафта изменяются мало, а для деревьев I и II классов Крафта они практически стабильны. Деревья III класса Крафта наиболее близки к среднему диаметру и средней высоте всего насаждения: по диаметру они отличаются на 7 %, по высоте – на 2 %. Лесоводственной особенностью деревьев разных классов Крафта является не только специфика их рангового положения, но и характер функциональной реализации почвенно-световых приростов, как по диаметру, так и по высоте, в разные периоды времени. Например, во временной промежуток 124–134 года почвенно-световой прирост по диаметру у деревьев V класса Крафта был меньше по сравнению с I классом в 3,3 раза, а по высоте – в 3,9 раза.

© Мерзленко М.Д., Брынцев В.А., Мельник П.Г., Коженкова А.А., 2025

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

В период 142–149 лет разница в почвенно-световом приросте в высоту не изменилась, а по диаметру увеличилась до 4,3 раза. В динамике почвенно-световые приросты и относительные высоты показывают депрессию ростовых процессов у деревьев V класса Крафта, которые становятся кандидатами на отпад. В целом расчленение насаждения на классы Крафта отражает функциональную иерархию и показывает на существование ранговых структур дендроценоза и их устойчивость во времени.

Ключевые слова: лесные культуры, лиственница европейская, классы Крафта, редуционное число, почвенно-световой прирост, относительная высота

Благодарности: Работа В.А. Брынцева, А.А. Коженковой выполнена в рамках госзадания ГБС РАН по теме № 122042700002-6.

Для цитирования: Мерзленко М.Д., Брынцев В.А., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Лесоводственные особенности деревьев лиственницы европейской разных классов Крафта в лесных культурах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 9–19.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-9-19>

Original article

Silvicultural Characteristics of European Larch Trees of Different Kraft Classes in Forest Crops

Mikhail D. Merzlenko¹, Doctor of Agriculture, Prof., Chief Research Scientist;

ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

Vladimir A. Bryntsev², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof., Chief Research Scientist;

ResearcherID: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

Petr G. Melnik^{1,3}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Senior Research Scientist;

ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

Anna A. Kozhenkova², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Research Scientist;

ResearcherID: [AAN-2228-2021](https://orcid.org/0000-0003-1518-7165), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation; md.merzlenko@mail.ru, melnik_petr@bk.ru

²Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, ul. Botanicheskaya, 4, Moscow, 127276, Russian Federation; bryntsev@mail.ru, kozhenkova_anna@mail.ru

³Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow region, 141005, Russian Federation; melnik_petr@bk.ru

Received on January 23, 2024 / Approved after reviewing on April 18, 2024 / Accepted on April 21, 2024

Abstract. A comparative study of silvicultural characteristics of the growth of trees of various Kraft classes has been conducted in the forest crops of European larch (*Larix decidua* Mill.) growing in the centre of the Russian Plain in the conditions of a blueberry pine forest (*Pinetum myrtillosum*). The relevance of the work is due to the absence of similar studies for artificial dendrocenoses over the past 25 years. The dynamics of reduction numbers, soil-light increments and relative heights of trees of different Kraft classes at the maturity stage of the stand (124–149 years old) has been considered. It has been established that at the age of 124, 134 and 149 years old, reduction numbers and relative heights are strictly differentiated in terms of different Kraft classes and this feature has been maintained for 25 years. Moreover, from 124 to 149 years of age, the reduction numbers and relative heights for different Kraft classes change little, and for trees of Kraft classes I and II they are almost stable. Trees of

Kraft class III are closest to the average diameter and average height of the entire stand: they differ by 7% in diameter and by 2 % in height. The silvicultural peculiarity of trees of different Kraft classes is not only the specificity of their rank position, but also the nature of the functional implementation of soil-light increments, both in diameter and in height, in different periods of time. For example, in the time period of 124–134 years of age, the soil-light increment in diameter of trees of Kraft class V has been 3.3 times less than in class I, and in height – 3.9 times less. In the period of 141–149 years of age, the difference in soil-light increment in height has not changed, but in diameter it has increased to 4.3 times. In dynamics, the values of soil-light increment and relative height show a depression of growth processes in trees of Kraft classes V, which become candidates for mortality. In general, the division of the plantation into Kraft classes reflects the functional hierarchy and shows the existence of rank structures of the dendrocenosis and their stability over time.

Keywords: forest crops, European larch, Kraft classes, reduction number, soil-light increment, relative height

Acknowledgements: The research by V.A. Bryntsev and A.A. Kozhenkova was carried out within the framework of the state assignment of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences on the topic no. 122042700002-6.

For citation: Merzlenko M.D., Bryntsev V.A., Melnik P.G., Kozhenkova A.A. Silvicultural Characteristics of European Larch Trees of Different Kraft Classes in Forest Crops. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 9–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-9-19>

Введение

Лиственницы (*Larix Mill.*), включая лиственницу европейскую (*Larix decidua Mill.*), относятся к ценным лесообразующим породам, характеризующимся быстротой роста, устойчивостью к неблагоприятным внешним воздействиям, высококачественной древесиной, что обуславливает интерес к вопросам их репродукции и выращивания в лесных культурах [4, 5, 13, 24, 26, 27, 29, 33–36], в т. ч. на европейской части России [3, 6–9, 14, 16, 17, 21, 23, 28, 32].

Классификация Крафта базируется на свойственной природе леса дифференциации деревьев по степени господства и угнетения. В чистых по составу хвойных лесных культурах такое распределение деревьев особенно четко выражено с их 30-летнего возраста [15]. Затем к 100–120 годам ситуация стабилизируется, т. е. переход из класса в класс, как правило, после достижения деревьями 100-летнего возраста почти прекращается.

Основную массу древесины образуют деревья высших (I и II) классов Крафта [10, 18]. Деревья I, II и III классов дают максимальное количество семян [20, 22]. Кроме того, деревья III класса являются самыми продуктивными в отношении работы хвои [2, 31]. Они более интенсивно расходуют ассимилянты на образование текущего прироста абсолютно сухой древесной массы ствола.

Классификация Крафта находит применение и в практике лесного хозяйства [12, 25]. Например, она используется в ходе выполнения рубок ухода по низовому методу, когда удаляются деревья V и частично IV классов.

Цель нашего исследования – на примере стационарного участка лесных культур лиственницы европейской проанализировать в разрезе разных классов Крафта динамику редуционных чисел, изменений почвенно-световых приростов по диаметру и высоте и относительных высот за 25-летний период.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужил стационарный участок лесных культур лиственницы европейской (см. рисунок), находящийся в зоне смешанных лесов Центра Русской равнины (северо-восток Московской области). Тип леса – сосняк-черничник свежий (B_2), почва дерновая-слабоподзолистая супесчаная, сформированная на флювиогляциальных отложениях – это типичные для сосны лесорастительные условия.

Лесные культуры лиственницы европейской созданы методом посева в 1870 г. и сегодня представляют собой монокультуры этой хвойной породы. При их выращивании удалялись только сухостойные деревья. В данном насаждении была заложена постоянная пробная площадь, на которой в возрасте лесокультур 124, 134, 141 и 149 лет выполнялась перечислительная таксация, позволившая получить таксационные показатели в динамике (табл. 1). На протяжении 25 лет наблюдений культуры представляли собой высокобонитетное и очень высокопроизводительное насаждение. После засухи 2010 г. случайно попавшая при посеве примесь сосны, а также почти вся естественно возобновившаяся ель выпали из состава насаждения.



Искусственное насаждение
лиственницы европейской
The artificial planting of European larch

Таблица 1

Динамика таксационных показателей лесных культур лиственницы европейской
The dynamics of the inventory indicators of European larch forest crops

Возраст, лет	Ярус	Состав	Среднее		N, шт./га	G, м ² /га	M, м ³ /га
			H, м	D, см			
124	1	10Л	37,0	45,5	363	58,5	1029
124	1	Ед. С	30,3	34,1	18	1,2	14
<i>Итого</i>					381	59,7	1043
134	1	10Л	37,8	46,2	359	65,3	1061
134	1	Ед. С	32,0	36,5	18	1,5	20
100	2	10Е	15,0	18,0	22	0,5	4
<i>Итого</i>					399	67,3	1065
141	1	10Л	38,2	47,9	343	69,9	1113

Окончание табл. 1

Возраст, лет	Ярус	Состав	Среднее		N , шт./га	G , м ² /га	M , м ³ /га
			H , м	D , см			
141	1	Ед. С	35,0	38,0	8	0,9	13
90–110	2	10Е	15,8	18,2	20	0,5	4
<i>Итого</i>					371	71,3	1130
149	1	10Л	38,6	50,3	327	71,0	1162
100	2	10Е	21,0	19,1	4	0,1	1
<i>Итого</i>					331	71,1	1163

Примечание: H – высота; D – диаметр; N – число стволов; G – сумма площадей сечений; M – запас стволовой древесины.

В ходе таксации у каждого дерева не только замерялись диаметр и высота, но и фиксировался класс роста и развития по Крафту [30]. Это позволило рассчитать редуциционные числа для каждого класса Крафта как по диаметру, так и по высоте, %:

$$R_d = \frac{d_n}{d_m} 100,$$

где R_d – редуциционное число по диаметру конкретного класса; d_n, d_m – средние диаметры для конкретного класса и насаждения соответственно.

Аналогично рассчитывались редуциционные числа по всем классам Крафта и по высоте.

Почвенно-световые приросты по диаметру (см/год) и высоте (м/год) устанавливались по следующей формуле:

$$Z = \frac{n - n_1}{a - a_1},$$

где $n - n_1$ – изменение диаметра, см (высоты, м); $a - a_1$ – разница в годах наблюдений, лет.

Фактически почвенно-световые приросты представляют собой среднепериодические текущие приросты [19].

Помимо редуциционных чисел и почвенно-световых приростов в разрезе каждого класса Крафта также фиксировались относительные высоты (H/D) по Я.С. Медведеву [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Таксационная характеристика каждого дерева в насаждении определяется его положением по отношению к другим деревьям, или, по выражению Шиффеля, его рангом в насаждении [19]. Классификация Крафта, предусматривающая условное расчленение совокупности всех деревьев насаждения на 5 классов, представляет собой ранжирование на основании оценки успешности роста и развития деревьев. В табл. 2–4 анализируются лесоводственные особенности такого ранжирования.

Возрастная динамика редуциционных чисел у деревьев разных классов Крафта (табл. 2), как по диаметру, так и по высоте, свидетельствует об относительной стабильности этих значений в пределах каждого класса на протяжении 25 лет наблюдений. Максимальные отклонения от средних показателей –

до 12 % по диаметру (IV класс) и до 16 % по высоте (V класс) – отмечены только в подчиненной части искусственного насаждения. Лишь здесь есть сухостойные деревья.

Таблица 2

**Возрастная динамика редуционных чисел у деревьев
лиственницы европейской разных классов Крафта**
**The age dynamics of reduction numbers in the European larch
trees of different Kraft classes**

Показатель, год (возраст насаждения)	Редуционные числа (%) по классам Крафта				
	I	II	III	IV	V
<i>По диаметру</i>					
R_{d^b} , 1994 г. (124)	153	119	86	69	44
R_{d^b} , 2004 г. (134)	149	117	92	66	44
R_{d^b} , 2011 г. (141)	148	118	97	76	51
R_{d^b} , 2019 г. (149)	147	117	97	76	50
<i>Среднее</i>	149	118	93	78	47
<i>По высоте</i>					
R_{h^b} , 1994 г. (124)	108	103	96	86	56
R_{h^b} , 2004 г. (134)	119	106	93	73	47
R_{h^b} , 2011 г. (141)	118	106	98	73	46
R_{h^b} , 2019 г. (149)	110	104	97	88	71
<i>Среднее</i>	114	105	98	80	55

Примечание: R_h – редуционное число по высоте.

Наиболее близки по средним диаметру и высоте к средним показателям насаждения деревья III класса Крафта: по диаметру они меньше на 7 %, а по высоте – на 2 %. Совокупность преобладающих деревьев насаждения (I класс Крафта) – самые развитые и крупные деревья – превышает средний диаметр на 49 % с отклонениями не более 4 %. Средняя высота деревьев I класса Крафта больше значений для насаждения на 14 %, с отклонениями не более чем на 6 %.

По диапазону значений редуционных чисел от I до V класса можно судить о характере (степени) дифференциации диаметров и высот искусственного насаждения лиственницы европейской. Так, у деревьев I класса Крафта редуционные числа по диаметру превышают редуционные числа деревьев V класса в 3,2 раза, а по высоте – в 2,1 раза. Получается, что диапазон для диаметров значительно шире по сравнению с диапазоном высот.

Почвенно-световые приросты (табл. 3) в пределах каждого возрастного периода, как для диаметров, так и для высот, тоже строго дифференцированы по классам Крафта. В возрастной динамике происходит падение почвенно-световых приростов. Это связано с тем, что лесные культуры лиственницы европейской приближаются к фазе распада.

Деревья V класса, по терминологии А.В. Абатурова [1], находятся в естественной депрессии роста. По нашим данным, в последний период учета (142–149 лет) у деревьев V класса по сравнению с I классом почвенно-световой прирост оказался меньше по диаметру в 4,3 раза, по высоте – в 3,9 раза, а в более ранний период (124–134 года) по диаметру этот показатель был меньше в 3,3 раза, тогда как по высоте имел такое же значение. Это говорит об увели-

чении с возрастом разрыва в почвенно-световом приросте по диаметру между деревьями V и I классов. Что касается самой депрессии роста, то она вызвана как воздействием фитоценотического положения, так и влиянием абиотических факторов, причем в их числе наиболее сильное влияние оказала на деревья V класса Крафта засуха 2010 г. Это впоследствии приведет к повышению их отпада. Следует отметить, что в искусственном древостое лиственницы европейской сухой может сохраняться до 15 и (реже) более лет, прежде чем перейдет в валежник.

Таблица 3

**Почвенно-световой прирост по диаметру и высоте у деревьев
лиственницы европейской разных классов Крафта**
**The soil-light increment in diameter and height of the European larch
trees of different Kraft classes**

Возрастные периоды, лет	Приросты по классам Крафта				
	I	II	III	IV	V
<i>По диаметру, см/год</i>					
124–134	0,52	0,39	0,29	0,26	0,16
135–141	0,46	0,34	0,29	0,20	0,11
142–149	0,39	0,22	0,21	0,15	0,09
<i>По высоте, м/год</i>					
124–134	0,35	0,18	0,15	0,10	0,09
135–141	0,24	0,19	0,12	0,09	0,06
142–149	0,14	0,13	0,13	0,10	0,04

Относительные высоты четко увеличиваются от I класса к V (табл. 4). При этом на протяжении 25 лет прегосподствующие и господствующие деревья (I и II классы Крафта) меньше варьируют по относительным высотам, чем деревья других классов, и особенно V.

Таблица 4

Относительные высоты в разрезе классов Крафта
The relative height values by Kraft classes

Возраст лесных культур, лет	Относительные высоты по классам Крафта					Среднее
	I	II	III	IV	V	
124	57	71	91	88	88	79
134	65	74	83	90	87	80
141	64	71	80	77	72	73
149	59	68	77	89	119	82
Среднее	61	71	83	86	92	79
Отклонение: максимальное	+4	+3	+8	+4	+27	+3
минимальное	-4	-3	-6	-9	-20	-6

Считается, что относительная высота не должна превышать 115. Если же она больше этой величины (у нас для V класса это 119), то деревья оказываются совершенно неустойчивыми против воздействий неблагоприятных внешних факторов и погибают, образуя так называемый низовой отпад. В целом по насаждению лиственницы европейской деревья I и II классов Крафта со 124

по 149 лет обладают самыми хорошими относительными высотами, что в сочетании с почвенно-световыми приростами является свидетельством их стабильного жизненного потенциала.

Выводы

1. Редукционные числа, почвенно-световые приросты и относительные высоты строго дифференцированы по классам Крафта. Характер распределения этих показателей по классам Крафта сохранялся на протяжении 25 лет – с возраста насаждения от 124 до 149 лет.

2. Лесоводственной особенностью деревьев разных классов Крафта является не только специфика их рангового положения в насаждении, но и характер реализации ими почвенно-световых приростов.

3. Прегосподствующие и господствующие деревья (I и II классы) по редукционным числам и относительным высотам, основанным на биометрии диаметров и высот, сохраняли свои показатели без существенного варьирования на протяжении 25 лет наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абатуров А.В. Толерантность основных лесобразующих пород в условиях рекреационного лесопользования // Динамика и устойчивость рекреационных лесов: сб. ст. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2006. С. 25–65.

Abaturov A.V. Tolerance of the Main Forest-Forming Species in the Conditions of Recreational Forest Management. *Dynamics and Sustainability of Recreational Forests: Collection of Articles*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2006, pp. 25–65. (In Russ.).

2. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса сосны и ели в Европейской части России. Архангельск: АГТУ, 2004. 112 с.

Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *Phytomass of Pine and Spruce in the European part of Russia*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2004. 112 p. (In Russ.).

3. Брынцев В.А., Лавренов М.А. Оценка результатов интродукции видов рода *Larix* Mill. в центр Европейской части России // Хвойные бореал. зоны. 2019. Т. 37, № 6. С. 385–395.

Bryntsev V.A., Lavrenov M.A. Assessment of Results of Introduction of Species of the Genus *Larix* Mill. in the Centre of the European Part of Russia. *Khvojnye boreal'noj zony = Conifers of the Boreal Area*, 2019, vol. 37, no. 6, pp. 385–395. (In Russ.).

4. Брынцев В.А., Лавренов М.А., Коженкова А.А. Исследование морфологических признаков и посевных качеств семян видов рода *Larix* Mill. в условиях интродукции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 26–38. (In Russ.).

Bryntsev V.A., Lavrenov M.A., Kozhenkova A.A. Studying Morphological Characteristics and Sowing Qualities of Seeds of Species of the Genus *Larix* Mill. in the Conditions of Introduction. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 2, pp. 26–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-2-26-38>

5. Ирошников А.И. Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. М.: ВНИИЛМ, 2004. 182 с.

Iroshnikov A.I. *Larches of Russia. Biodiversity and Breeding*. Moscow, All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry Publ., 2004. 182 p. (In Russ.).

6. Карасев Н.Н. Повышение продуктивности лесов Подмосквья путем интродукции лиственницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Москва, 2009. 20 с.

Karasev N.N. *Increasing the Productivity of Forests in the Moscow Region through the Introduction of Larch*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 20 p. (In Russ.).

7. Качанова Ю.П. Исследование особенностей семеношения лиственниц в условиях северо-запада России // *Соврем. науч. исследования и инновации*. 2017. № 5(73). С. 32.

Kachanova Yu.P. Studying the Features of Larch Seed Formation in the North-West of Russia. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii* = Modern Scientific Researches and Innovations, 2017, no. 5(73), p. 32. (In Russ.).

8. Коженкова А.А., Мерзленко М.Д. Географические культуры лиственницы в Серебряноборском опытном лесничестве // *Лесн. комплекс: состояние и перспективы развития: сб. по итогам XVII Междунар. науч.-техн. конф.* № 49. Брянск, 2017. С. 99–101.

Kozhenkova A.A., Merzlenko M.D. Geographical Cultures of Larch in the Serebryanobor Experimental Forestry. *Forestry Complex: Status and Development Prospects: Collection of the Results of the XVII International Scientific and Technical Conference*. Bryansk, 2017, no. 49, pp. 99–101. (In Russ.).

9. Логунов Д.В. Экологические особенности роста и развития представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в условиях антропогенных ландшафтов Нижегородской области: дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2002. 287 с.

Logunov D.V. *Ecological Features of Growth and Development of Representatives of the Genus Larch (Larix Mill.) in the Conditions of Anthropogenic Landscapes of the Nizhny Novgorod Region*: Cand. Biol. Sci. Diss. Nizhniy Novgorod, 2002. 287 p. (In Russ.).

10. Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 168 с.

Maslakov E.L. *Formation of Young Pine Stands*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 168 p. (In Russ.).

11. Медведев Я.С. К учению о влиянии света на развитие древесных стволов // *Лесн. журн.* 1884. Вып. 5 и 6. С. 326–373.

Medvedev Ya.S. On the Doctrine of the Influence of Light on the Development of Tree Stems. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1884, iss. 5 and 6, pp. 326–373. (In Russ.).

12. Мелехов И.С. Лесоводство. 2-е изд. М.: МГУЛ, 2002. 320 с.

Melekhov I.S. *Forestry*: 2nd ed. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2002. 320 p. (In Russ.).

13. Мельник Л.П. Естественное возобновление лиственницы европейской за пределами ареала при минимальном количестве семенников // *Лесн. вестн. / Forestry Bulletin*. 2021. Т. 25, № 6. С. 39–44.

Melnik L.P. Natural Regeneration of European Larch Outside Natural Area with Minimum of Seed Trees. *Lesnoy Vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 39–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-39-44>

14. Мельник П.Г., Мерзленко М.Д., Лобова С.Л. Результат выращивания климатипов лиственницы в географических культурах северо-восточного Подмосквья // *Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та*. 2016. № 2(136). С. 62–67.

Melnik P.G., Merzlenko M.D., Lobova S.L. The Result of Growing Larch Climatypes in Geographical Cultures of the North-Eastern Moscow Region. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2016, no. 2(136), pp. 62–67. (In Russ.).

15. Мерзленко М.Д. Эталон деятельности лесоведа. М.: Изд. дом Рученькиных, 2022. 174 с.

Merzlenko M.D. *The Standard of Forestry Activity*. Moscow, Ruchen'kin Publ. House, 2022. 174 p. (In Russ.).

16. Мерзленко М.Д., Коженкова А.А., Брынцев В.А. Лесокультурно-лесоводственные особенности уникального типа лесных культур лиственницы европейской. // *Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та*. 2016. № 12(146). С. 50–54.

Merzlenko M.D., Kozhenkova A.A., Bryntsev V.A. Silvicultural Features of the Unique Type of Forest Crops of European Larch. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2016, no. 12(146), pp. 50–54. (In Russ.).

17. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Результаты выращивания климатипов лиственницы в географических культурах Западного Подмосковья // Вестн. Алтайск. гос. аграрн. ун-та. 2018. № 1(159). С. 72–77.

Merzlenko M.D., Melnik P.G., Kozhenkova A.A. Growth Results of Larch Climotypes in Geographical Plantations of the Western Part of the Moscow Region. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2018, no. 1(159), pp. 72–77. (In Russ.).

18. Морозов Г.Ф. Основания учения о лесе: лекции, читанные в Таврическом Университете. Репринтное издание. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. 330 с.

Morozov G.F. *Foundations of the Doctrine of Forest: Lectures Given at the Taurida University: reprint. ed.* Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2011. 330 p. (In Russ.).

19. Орлов М.М. Лесная таксация. Л.: Ленинградск. лесн. ин-т, 1925. 510 с.

Orlov M.M. *Forest Inventory*. Leningrad, Leningrad Forestry Institute Publ., 1925. 510 p. (In Russ.).

20. Редько Г.И., Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Лесные культуры. СПб.: ГЛТА, 2005. 366 с.

Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A. *Forest Crops*. St. Petersburg, State Forestry Academy Publ., 2005. 366 p. (In Russ.).

21. Рубцов М.В., Глазунов Ю.Б., Николаев Д.К. Лиственница европейская в центре Русской равнины // Лесн. хоз-во. 2011. № 5. С. 26–29.

Rubtsov M.V., Glazunov Yu.B., Nikolaev D.K. European Larch in the Centre of the Russian Plain. *Lesnoe khozyajstvo*, 2011, no. 5, pp. 26–29. (In Russ.).

22. Соболев А.Н. Плодоношение лесных насаждений // Плодоношение лесных насаждений. СПб.: Типо-литография М.П. Фроловой, 1908. С. 1–62. (In Russ.).

Sobolev A.N. Fruiting of Forest Plantations. *Fruiting of Forest Plantations*. St. Petersburg, M.P. Frolova Typography, 1908, pp. 1–62. (In Russ.).

23. Abaimov A.P., Barzut V.M., Berkutenko A.N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L.I., Polezhaev A., Putenikhin V.P., Takata K. Seed Collection and Seed Quality of *Larix* spp. from Russia: Initial Phase on the Russia-Scandinavian Larch Project. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2002, no. 4, pp. 39–49.

24. Bryntsev V.A., Lavrenov M.A., Vasiliev S.B., Savchenkova V.A., Nikitin V.F. Comparative Analysis of Variability of Morphological Characteristics of European and Japanese Larches with Their Hybrids. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 574, art. no. 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012007>

25. Burschel P., Huss J. *Grundriß des Waldbaus*. Berlin: Parey Buchverlag, 1977. 487 p. (In Germ.).

26. Danek M., Chuchro M., Danek T. Extreme Growth Reaction of Larch (*Larix decidua* Mill.) from the Polish Sudetes and Carpathians: Spatial Distribution and Climate Impact. *Trees*, 2021, vol. 35, pp. 211–229. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02029-z>

27. Dušek D., Novák J. The Effect of Thinning on the Growth of a Substitute Forest Stand of European Larch (*Larix decidua* Mill.). *Zprávy Lesnického Výzkumu*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 136–142. (In Czech with Eng. Summary). <https://doi.org/10.59269/zlv/2024/2/728>

28. Fedorkov A. Stem Growth and Quality of Six Provenances of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* Ledeb. in a Field Trial Located in North-West Russia. *Baltic Forestry*, 2017, vol. 23, no. 3(46), pp. 603–607.

29. Izvorska K., Muter E., Fleischer P., Zielonka T. Delay of Growth Release after a Windthrow Event and Climate Response in a Light-Demanding Species (European Larch *Larix decidua* Mill.). *Trees*, 2022, vol. 36, pp. 427–438. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02218-4>

30. Kraft G. *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Hannover, Klindworth's Verlag, 1884. 148 p. (In Germ.).

31. Lewandovski A. *Modrew Polski (L. decidua Mill. subsp. polonica (Racib.) Domin): Struktura Genetyczna Populacji oraz jego Pochodzenie w Swetle Badan Izoenzy-mowych*. Kornik, 1995. 72 p. (In Pol.).

32. Pfalz W. Die Europäische Lärche in Zentrum der Russischen Tiefebene. *AFZ – der Wald*, 2014, no. 3, pp. 23–25. (In Germ.).

33. Slobodník B., Gутtenberger H. Zygotic Embryogenesis and Empty Seed Formation in European Larch (*Larix decidua* Mill.). *Annals of Forest Science*, 2005, vol. 62, no. 2, pp. 129–134. <https://doi.org/10.1051/forest:2005004>

34. Szaban Ja., Kowalkowski W., Łacka A., Karaszewski Z. Wood Density in European Larch (*Larix decidua* Mill.) from Selected Provenances Grown at the Siemianice Forest Experimental Station. *Drewno = Wood*, 2021, vol. 64, no. 207, pp. 27–41. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.378.08>

35. Szymański N., Wilczyński S. Radial Growth Response of European Larch Provenances to Interannual Climate Variation in Poland. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 3, art. no. 334. <https://doi.org/10.3390/f12030334>

36. Teodosiu M., Mihai G., Ciocîrlan E., Curtu A.L. Genetic Characterisation and Core Collection Construction of European Larch (*Larix decidua* Mill.) from Seed Orchards in Romania. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 8, art. no. 1575. <https://doi.org/10.3390/f14081575>

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

Научная статья

УДК 630*232.32

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-20-34

Особенности выращивания посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесных питомниках Зауралья

М.В. Ермакова, *д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.*; ResearcherID: [AAE-9520-2020](https://orcid.org/0000-0002-9894-6587),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>

Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; m58_07e@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.23 / Одобрена после рецензирования 26.02.24 / Принята к печати 28.02.24

Аннотация. Изучены повреждение стволиков сеянцев сосны при проведении ручного ухода в посевах, густота посевов и выход стандартного посадочного материала, базисная плотность древесины стволиков 2-летних сеянцев сосны обыкновенной в питомниках лесной и лесостепной зон Зауралья. В полевых условиях проводили сортировку сеянцев по характеру повреждения стволиков. В лаборатории измеряли биометрические показатели сеянцев и определяли базисную плотность древесины стволиков в 1-й и 2-й годы роста по методу максимальной влажности. Установлено, что посадочный материал сосны обыкновенной в питомниках лесной и лесостепной зон Зауралья подразделяется на 3 основные категории: без признаков механических повреждений, с признаками механических повреждений и с раздвоением стволика, возникающим в результате спонтанных или индуцированных мутаций. Доля сеянцев с механическим повреждением в питомниках лесной зоны невелика – не более 11 %. В питомниках лесостепной зоны таких сеянцев – 30 %. Показано, что в питомниках лесной зоны в некоторых случаях густота посевов повышена. Выход стандартных 2-летних сеянцев сосны значительно варьирует по питомникам как лесной, так лесостепной зоны и не имеет четко выраженной связи с густотой стояния. Отмечено, что 2-летние сеянцы, выращенные в питомниках лесной зоны, характеризуются значительно более низкими биометрическими показателями стволиков. Установлено, что в 1-й год выращивания сеянцы сосны в лесной и лесостепной зонах практически не различаются по темпам роста в высоту. На 2-й год сеянцы сосны лесостепной зоны в основном имеют значительно более высокие темпы роста в высоту, чем сеянцы в лесной зоне. У сеянцев сосны в лесной зоне базисная плотность древесины стволиков существенно лучше по сравнению с сеянцами лесостепной зоны. Соотношение этого показателя у побегов 2-го и 1-го годов выращивания для питомников лесной зоны составляло в среднем – 0,80, а для лесостепной – 0,85.

Ключевые слова: лесные питомники, сосна обыкновенная, сеянцы, механическое повреждение стволиков, плотность древесины

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН» (регистрационный номер 1022040300042-6-1.6.19; 1.6.14;4.1.2).

Для цитирования: Ермакова М.В. Особенности выращивания посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесных питомниках Зауралья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 20–34. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-20-34>



Original article

Features of Growing the Planting Material of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Forest Nurseries of the Trans-Urals

Mariya V. Ermakova, Doctor of Agricultural Sciences, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAE-9520-2020](https://orcid.org/0000-0002-9894-6587), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>

Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; m58_07e@mail.ru

Received on November 25, 2023 / Approved after reviewing on February 26, 2024 / Accepted on February 28, 2024

Abstract. The damage to the stems of pine seedlings during manual care in crops, the density of crops and the yield of standard planting material, as well as the basic density of wood of the stems of 2-year-old Scots pine seedlings in nurseries of the forest and forest-steppe zones of the Trans-Urals have been studied. In field conditions, seedlings have been sorted according to the nature of the damage to the stems. In the laboratory, the biometric parameters of seedlings have been measured and the basic density of the wood of the stems in the 1st and 2nd years of growth using the maximum moisture method. It has been established that the planting material of Scots pine in nurseries of forest and forest-steppe zones of the Trans-Urals is divided into 3 main categories: without signs of mechanical damage, with signs of mechanical damage and with bifurcation of the stem, arising as a result of spontaneous or induced mutations. The proportion of seedlings with mechanical damage in forest zone nurseries is small – no more than 11 %. In nurseries of the forest-steppe zone such seedlings account for 30 %. It has been shown that in forest zone nurseries, in some cases, the density of crops is increased. The yield of standard 2-year-old seedlings varies significantly across nurseries in both the forest and forest-steppe zones and does not have a clearly defined relationship with the density of the stand. It has been noted that 2-year-old pine seedlings grown in forest zone nurseries are characterized by significantly lower biometric parameters of the stems. It has been established that in the 1st year of cultivation, pine seedlings in the forest and forest-steppe zones practically do not differ in height growth rates. In the 2nd year, pine seedlings in the forest-steppe zone generally have significantly higher growth rates in height than seedlings in the forest zone. In pine seedlings in the forest zone, the basic density of the wood of the stems is significantly higher compared to seedlings in the forest-steppe zone. The ratio of this indicator for shoots of the 2nd and 1st years of cultivation for nurseries in the forest zone has averaged 0.80, and for the forest-steppe – 0.85.

Keywords: forest nurseries, Scots pine, seedlings, mechanical damage to the stems, wood density

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment for the Federal State Budgetary Scientific Institution “Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” (registration no. 1022040300042-6-1.6.19; 1.6.14;4.1.2).

For citation: Ermakova M.V. Features of Growing the Planting Material of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Forest Nurseries of the Trans-Urals. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 20–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-20-34>

Введение

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является одной из важнейших в экономическом и экологическом отношениях древесной породой для всего

Уральского региона, включая и Зауралье (Свердловская и Курганская области). Интенсивное использование сосновых лесов главным образом в целях получения древесины, а также периодически повторяющиеся широкомасштабные лесные пожары привели к необходимости постоянного интенсивного лесовосстановления, в т. ч. искусственным путем, на всей территории Зауралья. Соответственно, требуется обеспечение этого процесса стандартным посадочным материалом (Нормы выхода стандартных семян деревьев и кустарников в лесных питомниках Российской Федерации от 25.10.1995, приказ № 144) сосны обыкновенной [13].

Искусственное лесовосстановление сосны на территории исследования осуществляется преимущественно путем посадки на лесокультурных площадях 2-летних семян сосны по подготовленным плужным бороздам.

Основная часть посадочного материала сосны в Зауралье выращивается в лесных базисных питомниках, которые функционируют уже не одно десятилетие [15]. Естественно, что в питомниках наблюдается сильное истощение почв и, как следствие, снижение выхода посадочного материала хвойных пород. Сложившаяся ситуация решается прежде всего посредством интенсификации агротехнических мероприятий, в т. ч. с помощью активного применения органических и неорганических удобрений, а также нетрадиционных инновационных препаратов [9, 17, 22].

В то же время необходимо учитывать некоторые слабоизученные факторы, которые могут оказывать негативное влияние на выход посадочного материала в лесных питомниках. Одним из основных агротехнических мероприятий при выращивании посадочного материала в Зауралье является уничтожение сорной травянистой растительности путем ручной прополки в течение всего периода выращивания [3]. Это зачастую приводит к механическому повреждению части семян. Однако до настоящего времени количество данных о фактических объемах пострадавших при ручных уходах семян, возможной связи количества повреждений с густотой посевов, а также воздействии таких повреждений на общий выход посадочного материала сосны незначительно [8].

Для искусственного лесовосстановления биометрические параметры 2-летних семян сосны и их соответствие требованиям стандарта (Правила лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления от 29.12.202, зарегистрирован 11.02.2022. № 67240) являются важным показателем качества посадочного материала. Однако, на наш взгляд, до настоящего времени уделяется недостаточное внимание физико-механическим свойствам древесины стволиков семян. А именно эти параметры, интегральным показателем которых может быть базисная плотность древесины, во многом обуславливают устойчивость семян и их способность успешно противостоять неблагоприятным факторам окружающей среды при дальнейшем произрастании на лесокультурной площади [7, 10, 23]. Это крайне важно для специфических почвенно-климатических условий Зауралья, при значительном дефиците посадочного материала и его периодической переброске из лесной зоны в лесостепную, а также в обратном направлении.

Цель работы – сравнительное комплексное изучение степени повреждаемости семян при ручных уходах, густоты их стояния, биометрических харак-

теристик, выхода стандартного посадочного материала, а также определение базисной плотности древесины стволиков 2-летних сеянцев сосны обыкновенной в питомниках сопредельных лесных районов лесной и лесостепной зон Зауралья.

Объекты и методы исследования

В весенний период 2020 г. были изучены биометрические параметры и базисная плотность древесины 2-летних сеянцев сосны, выращенных в условиях типичных базисных питомников лесной (Средне-Уральский таежный район – СУТР, Свердловская область) и лесостепной (Западно-Сибирский подтаежно-лесостепной район – ЗСПЛР, Курганская область) зон Зауралья. Лесные районы, где проводились исследования, непосредственно граничат друг с другом. Расстояние от крайней северной точки лесной зоны территории выполнения научных работ до крайней южной точки в лесостепной не превышает 400 км.

В целом климат района исследований [1, 2] характеризуется как континентальный. Годовая амплитуда среднемесячных температур воздуха (января–июля) в лесной зоне составляет – 34–44 °С и в лесостепной – 34–36 °С. Зима продолжительная, многоснежная, с частыми метелями. Для лесной зоны более типично короткое, умеренно теплое, а для Зауральской лесостепи – короткое, жаркое, периодически засушливое лето. Количество осадков в течение вегетационного периода составляет в лесной и лесостепной зонах 220–300 и 175–225 мм соответственно.

Почвенные условия питомников были представлены в достаточно широком диапазоне. Для лесной зоны характерны средне- и тяжелосуглинистые дерново-подзолистые почвы разной степени оподзоленности [6]. Содержание гумуса – повышенное (4,6–6,2 %), фосфора и калия – от очень низкого (2,7,0–13,0 мг·экв/100 г почвы) до среднего (1,0–9,0 мг·экв/100 г почвы) [16]. Следует отметить, что особенностью Березовского питомника является то, что на его территории есть участки как средне-, так и тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почв.

Для питомников лесостепной зоны свойственны легко- и среднесуглинистые светло-серые, серые лесные почвы и выщелоченные черноземы [6]. Содержание гумуса, фосфора и калия варьировало от очень низкого до повышенного – 1,0–4,8 %, 3,8–14,1, 2,8–12,0 мг·экв/100 г почвы соответственно [16]. Степень кислотности колебалась от слабокислой до кислой.

Во всех исследованных питомниках применялся безрядковый 6-строчный посев (рис. 1) со сдвоенными посевными строчками через 10–30–10–30–10 см, где 10 см – ширина сдвоенных строчек, 30 см – расстояние между отдельными сдвоенными строчками (общая ширина ленты – 90 см), межленточное пространство – 60 см. Общая ширина посевной площади, включая колею трактора, не превышала 1,5 м. Посев выполнялся сеялками СЛУ-5-20 и СЛП-М с соответствующей настройкой высевающего аппарата. Данная схема посевов применяется почти во всех питомниках лесной и лесостепной зон Зауралья. Она позволяет снизить уровень промерзания почвы в зимний период и ее иссушение при недостатке влаги летом.

При посеве использовались семена I класса качества местного происхождения с глубиной заделки 5–10 мм. Норма высева семян составляла 2,5 г/пог. м. Для предпосевной подкормки применялся суперфосфат в дозе 10–30 г/м².



Рис. 1. Сеянцы сосны на 2-й год выращивания при 6-строчном посеве со сдвоенными строчками
Fig. 1. Pine seedlings in the 2nd year of cultivation with 6-row-double-row-sowing

Для оценки густоты стояния сеянцев при узкострочном посеве в регионе распространен норматив 100 шт./пог. м для лесной и 80 шт./пог. м для лесостепной зоны [14, 16].

Для каждой зоны было подобрано по 5 наиболее типичных лесных питомников: Ревдинский (1), Билимбаевский (2), Егоршинский (3), Асбестовский (4), Березовский (5) для лесной зоны; Кетовский (6), Просветский (7), Курганский (8), Шадринский (9), Куртамышский (10) для лесостепной. Следует отметить, что к настоящему времени часть исследованных питомников как в лесной, так и в лесостепной зоне вследствие высоких экономических затрат выведена из эксплуатации.

Для проведения исследования в каждом обследованном питомнике отбиралось не менее 1000 сеянцев путем закладки 2 диагональных трансект. Все отобранные сеянцы распределялись на поврежденные и неповрежденные, с установлением средней густоты посевов.

После этого методом случайной выборки из неповрежденных сеянцев отграничивали участок с произрастанием 100 сеянцев для проведения исследования. Поврежденные сеянцы разделялись на 3 группы: повреждение в 1-й год выращивания, повреждение во 2-й год выращивания и повреждение и в 1-й, и во 2-й годы выращивания.

В лабораторных условиях у каждого сеянца измерялись биометрические параметры – диаметр стволика у корневой шейки ($D_{к.ш}$), высота стволика ($H_{ств}$), длина прироста побегов за 1-й (Z_1) и 2-й годы вегетации (Z_2). Все сеянцы распределялись на 4 группы по требованиям стандарта: стандартные по $D_{к.ш}$ и стандартные по $H_{ств}$ (1); стандартные по $D_{к.ш}$ и нестандартные по $H_{ств}$ (2); нестандартные по $D_{к.ш}$ и стандартные по $H_{ств}$ (3); нестандартные по $D_{к.ш}$ и нестандартные по $H_{ств}$ (4). Стандарт устанавливался в соответствии с требованиями [15]: для СУТР $D_{к.ш}$ – не менее 1,0 мм, $H_{ств}$ – не менее 10 см; для ЗСПЛР $D_{к.ш}$ – не менее 2,5 мм, $H_{ств}$ – не менее 12 см.

Для побегов за 1-й и 2-й годы вегетации определяли базисную плотность древесины по методу максимальной влажности [5, 19]. Взвешивание осуществ-

вляли на аналитических весах X120 (Shimadzu). Точность взвешивания – до 0,0001 г.

Для апостериорного сравнения показателей использовался LSD-тест (критерий наименьшей значимости). Статистическая обработка данных производилась с применением MSO Excel 2013 и пакета программ Statistica 10.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных, полученных в результате проведенного исследования, показал, что посадочный материал сосны обыкновенной в питомниках лесной и лесостепной зон Зауралья можно разделить на 3 категории: без признаков механических повреждений, с признаками механических повреждений и сеянцы с раздвоением стволика, возникающим в результате спонтанных или индуцированных мутаций [4].

Для 2-летних сеянцев сосны с механическими повреждениями характерен хорошо заметный слом стволика при его повреждении в 1-й год роста, часто в сочетании с грубой утолщенной хвоей, или заметная деформация (утолщение) стволика в месте повреждения, если оно получено во 2-й год выращивания (рис. 2).

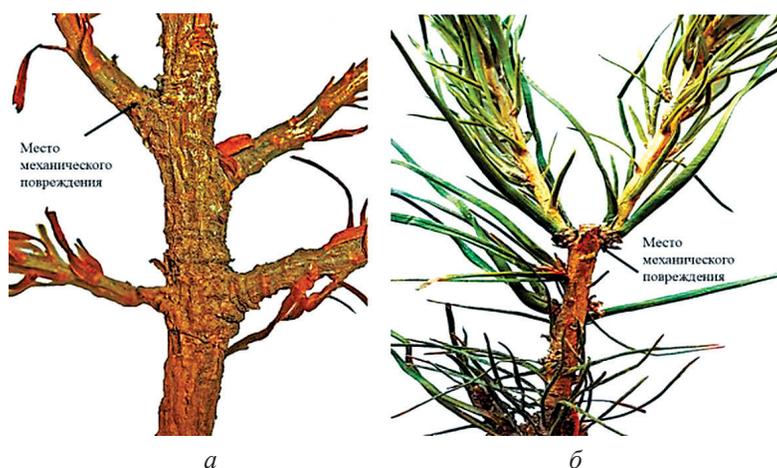


Рис. 2. Двухлетние сеянцы сосны с механическим повреждением стволика: *а* – в 1-й год выращивания; *б* – во 2-й год выращивания

Fig. 2. Two-year-old pine seedlings with mechanical damage to the stem: *a* – in the 1st year of cultivation; *b* – in the 2nd year of cultivation

Установлено, что средняя густота стояния сеянцев в посевных строчках (табл. 1) в питомниках лесостепной зоны и в 3 питомниках лесной зоны соответствовала нормативам или была близка к ним. Исключение составили питомники 2 и 3 в лесной зоне, где густота строчек оказалась на 24–57 % больше требований. Вероятно, в этих питомниках были завышены нормы высева семян, что и привело к значительному увеличению густоты посевов.

Количество сеянцев сосны с раздвоением стволика – двойчатки (спонтанный или индуцированный мутагенез) – оказалось примерно на одном уровне для лесной и лесостепной зон. Такие сеянцы составляли ощутимо незначительную долю от общего количества 2-летних сеянцев. Соответственно, они не влияли на общий объем выхода сеянцев.

Таблица 1

Распределение 2-летних сеянцев сосны по категориям повреждения стволиков
The distribution of 2-year-old pine seedlings by stem damage categories

Номер питомника	Количество сеянцев, шт./пог. м	Доля от общего количества сеянцев, %		
		без повреждений	с механическими повреждениям	двойчатки
<i>СУТР</i>				
1	110	90,1	9,0	0,9
2	157	94,0	5,0	1,0
3	124	88,9	10,8	0,3
4	88	89,0	8,0	3,0
5	105	88,2	11,0	0,8
<i>ЗСПЛР</i>				
6	71	68,2	30,0	1,8
7	85	74,0	25,2	0,8
8	80	72,9	27,0	0,1
9	76	68,0	30,0	2,0
10	87	79,0	20,0	1,0

В свою очередь, доля 2-летних сеянцев сосны с механическим повреждением стволика в питомниках лесной и лесостепной зон значительно различалась. В питомниках лесной зоны – не превышала 11 %. В питомниках лесостепной зоны уровень повреждения стволиков резко увеличивался и достигал 1/5–1/3 от общего количества.

В питомниках лесной зоны большая часть повреждений стволиков сеянцев (табл. 2) происходила на 2-й год выращивания. В питомниках лесостепной зоны уровень повреждаемости стволиков сеянцев сосны был примерно одинаковым в 1-й и 2-й годы выращивания. Следует отметить, что довольно значительная часть сеянцев получала механические повреждения стволика как в 1-й, так и во 2-й годы выращивания.

Таблица 2

Распределение повреждения стволиков 2-летних сеянцев сосны по годам выращивания

The distribution of damage to the stems of 2-year-old pine seedlings by year of cultivation

Номер питомника	Доля от общего количества поврежденных сеянцев, %, за год(ы) выращивания		
	1-й	2-й	1-й и 2-й
<i>СУТР</i>			
1	59,1	30,2	9,7
2	47,4	29,1	23,5
3	53,5	18,5	30,2
4	60,0	18,3	21,7
5	64,2	28,2	17,6
<i>ЗСПЛР</i>			
6	38,9	30,0	31,1
7	35,4	36,0	28,6
8	39,0	36,0	25,0
9	37,8	35,1	27,1
10	45,0	38,4	16,6

Данная ситуация, особенно в питомниках лесостепной зоны, требует изменений в проведении агротехнических мероприятий по выращиванию сеянцев сосны. Одним из вариантов решения проблемы является применение различных гербицидов для борьбы с сорной растительностью [11, 20, 22]. Однако данный подход имеет целый ряд негативных последствий. Прежде всего, гербициды могут оказывать неблагоприятное воздействие на сеянцы [21], а также накапливаться в почве. Кроме того, сорные растения довольно быстро приобретают резистентность к гербицидам, что требует увеличения дозы препарата или его смены [3, 11, 12]. Вероятно, улучшение ситуации возможно только при комплексных изменениях в агротехнике выращивания сеянцев сосны, например, при снижении частоты прополок в посевах совместно с применением современных, более безопасных, препаратов для удаления сорной травянистой растительности и средств механизации [18].

Распределение неповрежденных 2-летних сеянцев по требованиям стандарта показало, что между отдельными питомниками как в лесной, так и в лесостепной зоне существуют значительные колебания (табл. 3) по доле каждой группы от общего количества неповрежденных сеянцев.

Таблица 3

Распределение неповрежденных 2-летних сеянцев сосны по группам стандарта
The distribution of intact 2-year-old pine seedlings by standard groups

Номер питомника	Группа			
	1	2	3	4
<i>СУТР</i>				
1	60,0	27,1	0	12,9
2	60,3	11,6	11,7	10,4
3	82,4	11,8	5,9	0
4	100,0	0	0	0
5	12,8	6,4	15,4	65,4
<i>ЗСПЛР</i>				
6	83,1	16,9	0	0
7	30,3	49,5	0	20,2
8	55,7	36,4	0	8,0
9	85,3	14,7	0	0
10	85,5	0,0	14,5	0

В питомниках лесной зоны, где была отмечена очень высокая густота стояния сеянцев (питомники 1–3), тем не менее наблюдалась довольно большая и даже очень большая (питомник 3) доля полностью стандартных сеянцев. В то же время в питомнике 5 (сопоставимом по густоте с питомником 1) доля таких сеянцев оказалась в 4,5 раза меньше, а основную часть 2-летних сеянцев составили полностью нестандартные. По видимости, в данном питомнике кроме истощенности почвы играет роль фактор тяжелого для выращивания сосны гранулометрического состава почвы. В питомнике 4 с густотой стояния сеянцев несколько ниже рекомендуемой все неповрежденные сеянцы соответствовали стандарту.

Доля полностью нестандартных семян в питомниках 1 и 2 была приблизительно равной, а в питомнике 3 семена с дефектами отсутствовали. Из остальных групп нестандартных семян в питомнике 1 представлена только группа 2. В питомниках 2 и 3 доля семян группы 2 оказалась примерно одинакова, доля группы 3 в питомнике 2 в 2 раза превышала долю таких семян в питомнике 3. В питомнике 5 количество семян группы 3 более чем в 2 раза превышало число семян группы 2.

В питомниках лесостепной зоны густота стояния семян характеризовалась как близкая к оптимальной и в питомниках 6, 9 и 10 доля полностью стандартных семян оказалась примерно одинаковой. При этом в питомнике 8 доля полностью отвечающих стандарту семян была в 1,5 раза ниже, чем в остальных питомниках лесостепной зоны. Наименьший выход (в 2,7 раза) полностью стандартных семян отмечен в питомнике 7 по сравнению с питомниками 6, 9 и 10.

Нестандартные семена в питомниках 6 и 9 были представлены семенами группы 2, в питомнике 10 – группой 3. Интересно отметить, что полностью нестандартные семена в этих питомниках не выявлены.

В свою очередь, в питомниках 7 и 8 вторыми по представленности из неповрежденных семян были нестандартные семена группы 2. Кроме того, в этих питомниках, особенно в питомнике 7, выявлена значительная доля полностью нестандартных 2-летних семян сосны.

Таким образом, не удалось пронаблюдать связь густоты посевов с объемом выхода стандартных и нестандартных семян сосны разных групп в питомниках как лесной, так и лесостепной зон.

Анализ биометрических характеристик посадочного материала сосны, проведенный с помощью LSD-теста, показал, что 2-летние семена в питомниках лесной зоны по всем группам стандарта достоверно (при $p \leq 0,05$) имеют значительно более низкие биометрические показатели по сравнению с семенами в питомниках лесостепной зоны Зауралья (табл. 4).

Обращает на себя внимание, что стандартные семена из питомников лесной зоны по $D_{к.ш}$ в основном значительно превосходят современные требования (2 мм), скорее, соответствуя более ранним (2,5 мм). Исключением является питомник 5 с тяжелым гранулометрическим, по сравнению с остальными питомниками, составом почвы. На наш взгляд, снижение требований к $D_{к.ш}$ для 2-летних семян сосны не оправдано, т. к. не способствует их устойчивости при посадке на лесокультурную площадь в достаточно сложных природно-климатических условиях лесной зоны Зауралья.

По темпам роста в высоту 2-летние семена сосны групп по стандарту 1–3 в лесной и групп 1–4 в лесостепной зоне имели более высокие темпы роста на 2-й год выращивания. У семян группы 4 в лесной зоне, напротив, на 2-й год отмечалось значительное снижение роста в высоту.

Стандартные и нестандартные семена сосны группы 3 в питомниках лесной зоны существенно не отличались (при $p \leq 0,05$) по темпам роста в высоту в 1-й год выращивания от семян лесостепной зоны. Однако на 2-й год полностью стандартные семена сосны из питомников лесостепной зоны имели значительно (при $p \leq 0,05$) более хороший рост в высоту по сравнению со стандартными семенами лесной зоны. Подобная динамика просматривается и у нестандартных семян групп 2–4. Это может объясняться фактором почвен-

но-климатических условий выращивания и генотипическими особенностями семян лесной и лесостепной зон Зауралья.

Таблица 4

Биометрические показатели 2-летних сеянцев сосны в питомниках
The biometric indicators of 2-year-old pine seedlings in nurseries

Номер питомника	Номер группы по стандарту	Показатель				
		$D_{к.ш}, \text{ см}$	$H_{ств}, \text{ см}$	$Z_1, \text{ см}$	$Z_2, \text{ см}$	Z_2/Z_1
<i>СУТР</i>						
1	1	$2,9 \pm 0,08$	$11,8 \pm 0,18$	$4,9 \pm 0,24$	$6,9 \pm 0,25$	$1,41 \pm 0,108$
	2	$2,6 \pm 0,09$	$8,6 \pm 0,20$	$3,1 \pm 0,09$	$5,4 \pm 0,17$	$1,74 \pm 0,036$
	4	$1,5 \pm 0,07$	$8,8 \pm 0,22$	$4,9 \pm 0,42$	$4,4 \pm 0,50$	$0,90 \pm 0,036$
2	1	$2,5 \pm 0,07$	$11,8 \pm 0,24$	$5,0 \pm 0,15$	$6,8 \pm 0,17$	$1,36 \pm 0,024$
	2	$2,3 \pm 0,05$	$9,4 \pm 0,09$	$4,3 \pm 0,21$	$5,1 \pm 0,23$	$1,19 \pm 0,042$
	3	$1,7 \pm 0,06$	$11,3 \pm 0,40$	$4,6 \pm 0,24$	$6,8 \pm 0,35$	$1,18 \pm 0,107$
	4	$1,7 \pm 0,04$	$9,0 \pm 0,22$	$5,5 \pm 0,19$	$4,1 \pm 0,17$	$0,76 \pm 0,106$
3	1	$2,9 \pm 0,07$	$13,0 \pm 0,22$	$5,7 \pm 0,14$	$7,4 \pm 0,13$	$1,30 \pm 0,104$
	2	$3,0 \pm 0,05$	$8,6 \pm 0,27$	$4,8 \pm 0,15$	$4,8 \pm 0,07$	$1,00 \pm 0,033$
	3	$1,7 \pm 0,05$	$13,0 \pm 0,48$	$6,1 \pm 0,55$	$6,9 \pm 0,40$	$1,13 \pm 0,052$
4	1	$3,4 \pm 0,09$	$14,9 \pm 0,30$	$5,8 \pm 0,12$	$6,0 \pm 0,21$	$1,03 \pm 0,142$
5	1	$2,2 \pm 0,05$	$13,2 \pm 0,38$	$6,3 \pm 0,19$	$6,9 \pm 0,20$	$1,10 \pm 0,042$
	2	$2,3 \pm 0,08$	$7,0 \pm 0,04$	$4,8 \pm 0,36$	$2,2 \pm 0,39$	$0,46 \pm 0,012$
	3	$1,8 \pm 0,07$	$12,3 \pm 0,16$	$5,3 \pm 0,14$	$6,4 \pm 0,13$	$1,20 \pm 0,088$
	4	$1,6 \pm 0,03$	$7,5 \pm 0,13$	$4,4 \pm 0,08$	$3,1 \pm 0,13$	$0,70 \pm 0,017$
<i>ЗСПЛР</i>						
6	1	$6,4 \pm 0,19$	$18,2 \pm 0,56$	$6,7 \pm 0,20$	$11,5 \pm 0,37$	$1,72 \pm 0,062$
	2	$4,4 \pm 0,38$	$10,7 \pm 0,10$	$4,4 \pm 0,28$	$6,2 \pm 0,36$	$1,40 \pm 0,042$
7	1	$4,1 \pm 0,20$	$14,6 \pm 0,13$	$4,9 \pm 0,25$	$9,7 \pm 0,28$	$1,98 \pm 0,011$
	2	$4,2 \pm 0,14$	$9,7 \pm 0,25$	$3,7 \pm 0,10$	$6,0 \pm 0,20$	$1,62 \pm 0,073$
	4	$2,0 \pm 0,13$	$9,6 \pm 0,29$	$4,1 \pm 0,15$	$5,5 \pm 0,19$	$1,34 \pm 0,083$
8	1	$5,2 \pm 0,16$	$15,3 \pm 0,26$	$6,8 \pm 0,47$	$8,5 \pm 0,16$	$1,25 \pm 0,006$
	2	$3,6 \pm 0,19$	$9,8 \pm 0,26$	$4,4 \pm 0,15$	$5,4 \pm 0,17$	$1,22 \pm 0,008$
	4	$2,2 \pm 0,08$	$7,9 \pm 0,34$	$2,9 \pm 0,21$	$5,0 \pm 0,16$	$1,72 \pm 0,012$
9	1	$5,3 \pm 0,15$	$16,8 \pm 0,39$	$5,9 \pm 0,19$	$10,9 \pm 0,32$	$1,84 \pm 0,050$
	2	$5,1 \pm 0,24$	$10,5 \pm 0,44$	$4,9 \pm 0,32$	$5,7 \pm 0,31$	$1,16 \pm 0,007$
10	1	$3,5 \pm 0,10$	$20,1 \pm 0,41$	$7,7 \pm 0,26$	$12,9 \pm 0,26$	$1,68 \pm 0,018$
	3	$2,1 \pm 0,06$	$16,0 \pm 1,00$	$6,8 \pm 0,91$	$9,2 \pm 0,15$	$1,35 \pm 0,031$

Дальнейший анализ результатов позволил установить, что по базисной плотности древесины побегов 1-го и 2-го годов выращивания сеянцы сосны (табл. 5), полученные в питомниках лесостепной зоны, значительно (при $p \leq 0,05$) уступают сеянцам лесной зоны, как в целом, так и по всем группам стандарта.

Таблица 5

Базисная плотность древесины 2-летних сеянцев сосны, кг/м³
The basic density of wood of 2-year-old pine seedlings, kg/m³

Номер питомника	Номер группы по стандарту	Базисная плотность побега года выращивания	
		1-го	2-го
<i>СУТР</i>			
1	1	432 ± 1,91	346 ± 1,98
	2	428 ± 1,37	320 ± 1,37
	4	443 ± 1,18	343 ± 4,33
2	1	423 ± 3,80	339 ± 1,56
	2	417 ± 8,28	333 ± 3,85
	3	434 ± 9,58	345 ± 2,50
	4	442 ± 1,37	338 ± 3,38
3	1	423 ± 2,61	339 ± 1,23
	2	408 ± 4,69	327 ± 2,83
	3	443 ± 7,58	343 ± 4,86
4	1	400 ± 2,10	320 ± 1,32
5	1	442 ± 5,63	356 ± 6,03
	2	411 ± 7,02	346 ± 1,32
	3	441 ± 6,62	360 ± 4,40
	4	423 ± 3,64	345 ± 3,55
<i>ЗСПЛР</i>			
6	1	367 ± 2,23	309 ± 2,19
	2	346 ± 8,46	295 ± 3,91
7	1	358 ± 5,29	307 ± 2,56
	2	344 ± 3,57	302 ± 1,74
	4	369 ± 4,04	305 ± 7,49
8	1	360 ± 1,75	302 ± 2,46
	2	358 ± 2,93	293 ± 1,80
	4	368 ± 2,34	305 ± 5,00
9	1	350 ± 1,80	297 ± 1,77
	2	345 ± 5,25	290 ± 3,27
10	1	386 ± 2,09	330 ± 1,35
	3	379 ± 5,92	330 ± 3,74

У сеянцев сосны из питомников лесостепной зоны базисная плотность древесины побегов за 1-й год выращивания фактически соответствует показателю для сеянцев лесной зоны 2-го года выращивания.

Низкая плотность древесины стволиков в сочетании с их значительными размерами у 2-летних сеянцев сосны в питомниках лесостепной зоны во многом, на наш взгляд, объясняет их высокую повреждаемость при ручных уходах.

В свою очередь, не выявлено достоверной взаимосвязи (при $p \leq 0,05$) между базисной плотностью древесины побегов 1-го и 2-го годов выращивания для различных групп по стандарту как в лесной, так и в лесостепной зонах.

Также не удалось зафиксировать корреляции густоты стояния сеянцев и их биометрических характеристик с базисной плотностью древесины 2-летних

сеянцев, как в питомниках лесной, так и лесостепной зоны. Вероятно, надо учитывать, что рост сеянцев по диаметру и по высоте определяется не только почвенно-климатическими условиями выращивания, но и их генотипическими особенностями.

Анализ соотношения базисной плотности побегов 2-го и 1-го годов выращивания для стандартных сеянцев сосны показал, что как для лесной, так для лесостепной зоны эта величина является довольно стабильной (рис. 3).

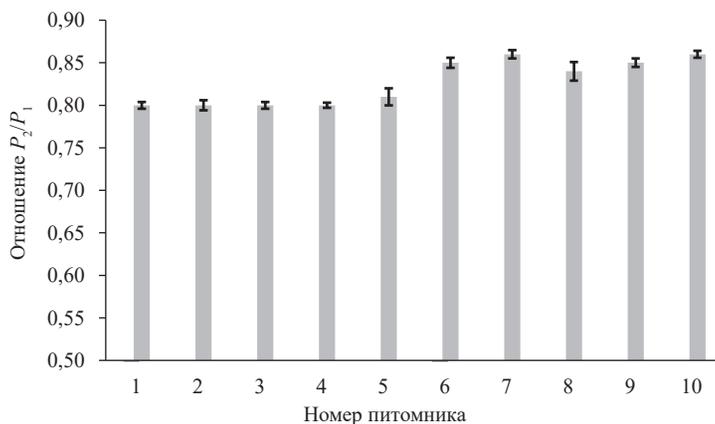


Рис. 3. Соотношение базисной плотности древесины (с ошибками среднего) побегов за 2-й (P_2) и 1-й (P_1) годы выращивания

Fig. 3. The ratio of the basic density of wood (with errors of the mean) of shoots for the 2nd (P_2) and 1st (P_1) years of cultivation

Таким образом, для 2-летних сеянцев сосны из питомников лесной зоны соотношение базисной плотности древесины побегов 2-го и 1-го годов выращивания составляло 0,80, а для лесостепной – 0,85. Такие данные могут служить качественным критерием для стандартных по биометрическим показателям 2-летних сеянцев сосны, выращенных в лесных питомниках Средне-Уральского таежного лесного района (лесная зона Зауралья) и Западно-Сибирского подтаежно-лесостепного лесного района (лесостепная зона).

У нестандартных 2-летних сеянцев сосны в питомниках как лесной, так и лесостепной зоны этот показатель, напротив, отличался заметным размахом. Для сеянцев группы 2 по стандарту это соотношение в питомниках лесной зоны колебалось от 0,74 до 0,84, а лесостепной – от 0,82 до 0,88. Для сеянцев группы 3 – 0,77–0,82 и 0,86–0,87 соответственно. Для сеянцев группы 4 – 0,77–0,82 и 0,83–0,87 соответственно.

Выводы

1. В питомниках лесной зоны наблюдался невысокий уровень механического повреждения сеянцев сосны при ручных агротехнических уходах. В питомниках лесостепной зоны, наоборот, до 30 % 2-летних сеянцев имели механические повреждения стволика, что требует серьезных изменений в агротехнике выращивания. Не установлено связи между количеством поврежденных сеянцев и густотой посевов.

2. Густота стояния 2-летних сеянцев сосны в лесных питомниках лесостепной зоны в целом соответствует существующим нормативам. В лесных

питомниках лесной зоны отмечается тенденция к значительно более высокой густоте стояния 2-летних сеянцев сосны по сравнению с рекомендованной.

3. Доля групп 2-летних сеянцев сосны при распределении по требованиям стандарта значительно различается по отдельным питомникам как в лесной, так и в лесостепной зоне и не связана с густотой посевов.

4. По биометрическим параметрам 2-летние сеянцы сосны из питомников лесостепной зоны значительно превосходят сеянцы из питомников лесной зоны.

5. По базисной плотности древесины, отражающей ее физико-механические свойства, 2-летние сеянцы сосны из питомников лесостепной зоны отстают от сеянцев из питомников лесной зоны.

6. Соотношение базисной плотности древесины побегов 1-го и 2-го годов выращивания для 2-летних стандартных сеянцев сосны является специфическим как для питомников лесной, так и лесостепной зоны.

7. Посадочный материал 2-летних сеянцев сосны, выращенный в условиях лесной и лесостепной зон Зауралья, существенно различается по комплексу биометрических показателей и характеристик древесины, что обуславливает использование его только в пределах зоны выращивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агроклиматические ресурсы Курганской области. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 8–35.

Agroclimatic Resources of the Kurgan Region. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, pp. 8–35. (In Russ.).

2. Агроклиматические ресурсы Свердловской области. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 8–36.

Agroclimatic Resources of the Sverdlovsk Region. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, pp. 8–36. (In Russ.).

3. Андреева Н.В., Бобрович Л.В. Сорные травы и меры борьбы с ними // Наука и образование. 2021. Т. 4, № 4. С. 1–6.

Andreeva N.V., Bobrovich L.V. Weeds and Measures to Combat Them. *Nauka i obrazovanie*, 2021, vol. 4, no. 4, pp. 1–6. (In Russ.).

4. Буторина А.К., Мурая Л.С., Исаков Ю.Н. Соматическая редукция хромосом у сосны обыкновенной // Цитология. 1984. Т. 26, № 7. С. 852–855.

Butorina A.K., Muraya L.S., Isakov Yu.N. Somatic Reduction of Chromosomes in Scots Pine. *Tsitologiya*, 1984, vol. 26, no. 7, pp. 852–855. (In Russ.).

5. Гайнуллин Рин.Х., Цветкова Е.М., Гайнуллин Рин.Х. К вопросу об истинной плотности древесины // Деревообр. пром-сть. 2020. № 2. С. 11–20.

Gainullin R.H., Tsvetkova E.M., Gainullin R.H. The Study of the Real Specific Gravity of Wood. *Derevoobrabatival'naya promishlennost' = Woodworking Industry*, 2020, no. 2, pp. 11–20. (In Russ.).

6. Гафуров Ф.Г. Почвы Свердловской области. Екатеринбург: Уральск. ун-т, 2008. 386 с.

Gafurov F.G. *Soils of the Sverdlovsk Region.* Yekaterinburg, Ural University Publ., 2008. 386 p. (In Russ.).

7. Демаков Ю.И., Демитрова И.П., Нуреева Т.В., Симатова Т.Ю. Влияние начальной густоты и интенсивности прореживания древостоя в культурах сосны на прирост и плотность древесины // Вестн. Поволж. гос. техн. ун-та. Сер.: Лес, экология, природопользование. 2019. № 2(42). С. 26–40.

Demakov Yu.I., Demitrova I.P., Nureeva T.V., Simatova T.Yu. The Effect of Initial Density and Thinning Intensity of a Pine Stand on Growth and Wood Density. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Pririodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2019, no. 2(42), pp. 26–40. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2019.2.26>

8. Ермакова М.В. Морфологические нарушения стволика 2-летних сеянцев сосны. Saarbrücken: Labert Academic Publishing GmbH&CoKG, 2012. 117 с.

Ermakova M.V. *Morphological Abnormalities of the Stem of 2-Year-Old Pine Seedlings*. Saarbrücken, Labert Academic Publishing GmbH&CoKG, 2012. 117 p. (In Russ.).

9. Ермакова М.В., Стеценко С.К., Андреева Е.М. Влияние высокоактивных соединений на механические свойства древесины двулетних сеянцев сосны обыкновенной в лесных питомниках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 88–99.

Ermakova M.V., Stetsenko S.K., Andreeva E.M. Influence of Highly Active Compounds on Mechanical Properties of Wood of Two-Year-Old Scots Pine Seedlings in Forest Nurseries. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 88–99. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-88-99>

10. Загородский М.А., Третьяков С.В., Коптев С.В. Плотность древесины сосны обыкновенной в осушаемом сосняке сфагновом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 160–171.

Zagorodski M.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V. Density of Scots Pine Wood in Drained Sphagnum Pine Forest. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 160–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-160-171>

11. Казаков В.И., Проказин Н.Е., Казаков И.В., Лобанова Е.И. Эффективность контактного нанесения гербицидов для борьбы с сорной растительностью в лесных питомниках // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1. С. 153–159.

Kazakov V.I., Prokazin N.E., Kazakov I.V., Lobanova E.I. Efficiency of Herbicides Contact Application to Fight against Weeds in Forest Nursery. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 153–159. (In Russ.).

https://doi.org/10.12737/article_5c920170d50c89.62305424

12. Малышкин Н.Г. Оценка риска устойчивости сорных растений к гербицидам // Агропродовольственная политика России. 2020. № 3. С. 8–11.

Malyshkin N.G. Risk Assessment of Weed Resistance to Herbicides. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii* = Agro-Food Policy in Russia, 2020, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.).

13. Мочалов С.А., Бобушкина С.В. Лесокультурное производство – основа непрерывного лесопользования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 80–96.

Mochalov B.A., Bobushkina S.V. Silvicultural Production as a Basis for Continuity of Forest Management. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 4, pp. 80–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-80-96>

14. Новосельцева А.И., Смирнов Н.А. Справочник по лесным питомникам. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 280 с.

Novosel'tseva A.I., Smirnov N.A. *Forest Nursery Directory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 280 p. (In Russ.).

15. Оплетаяев А.С., Залесов С.В., Жигулин Е.В. Состояние лесных питомников на территории Свердловской области // Междунар. науч.-исследоват. журн. 2020. № 3(93). Ч. 1. С. 77–84.

Opletayev A.S., Zalesov S.V., Zhigulin E.V. Condition of Forest Nurseries in Sverdlovsk Region. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* = International Research Journal, 2020, no. 3(93), part 1, pp. 77–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.93.3.011>

16. Редько Г.И., Бабич Н.А., Редько Н.Г. Лесные питомники. Вологда: АГТУ, 1996. 414 с.

Red'ko G.I., Babich N.A., Red'ko N.G. *Forest Nurseries*. Vologda, Arkhangelsk State Technical University Publ., 1996. 414 p. (In Russ.).

17. Романчук А.В., Юрениа А.В. Применение комплексного минерального удобрения пролонгированного действия «Базакот 6М» в посевном отделении сосны обыкновенной в лесных питомниках // Тр. БГТУ. Сер.: 1. 2019. № 1. С. 60–66.

Romanchuk A.V., Yurenya A.V. Application of Complex Mineral Fertilizer Prolonged Action “Bazakot 6M” in Cropping Separation of the Pine of an Ordinary Forest Kennels. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2019, ser. 1, no. 1, pp. 60–66. (In Russ.).

18. Саранчук А.П., Чигирь Е.С., Денисов Н.И. К проблемам модернизации лесного питомника // Велес. 2017. № 1-2(43). С. 63–69.

Saranchuk A.P., Chigir' E.S., Denisov N.I. On the Problems of Modernization of Forest Nursery. *Veles*, 2017, no. 1-2(43), pp. 63–69. (In Russ.).

19. Столяров Д.П., Полубояринов О.И., Декатов Н.Н., Книзе А.А., Минаев В.Н., Молоткова Н.Д., Некрасова Г.Н., Ананьев В.А. Методические рекомендации. Использование ядер древесины в лесоводственных исследованиях. Л.: ЛенНИИЛХ, 1988. 43 с.

Stolyarov D.P., Poluboyarinov O.I., Dekatov N.N., Knize A.A., Minaev V.N., Molotkova N.D., Nekrasova G.N., Anan'ev V.A. *Methodological Recommendations. Use of Wood Cores in Forestry Research*. Leningrad, Leningrad Research Institute of Forestry, 1988. 43 p. (In Russ.).

20. Тюкавина О.Н., Демина Н.А. Применение гербицидов при выращивании сеянцев хвойных пород в открытом грунте // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. XI, № 6. С. 513–518.

Tyukavina O.N., Demina N.A. The Use of Herbicides in the Cultivation of Coniferous Seedlings in Open Ground Nurseries. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2022, vol. XI, no. 6, pp. 513–518. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-6-513-518>

21. Фрейберг И.А., Ермакова М.В., Стеценко С.К. Модификационная изменчивость сосны обыкновенной в условиях пестицидного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 74 с.

Freiberg I.A., Ermakova M.V., Stetsenko S.K. *Modification Variability of Scots Pine under Conditions of Pesticide Pollution*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2004. 74 p. (In Russ.).

22. Aleksandrowicz-Trzcińska M., Bogusiewicz A., Szkop M., Drozdowski S. Effect of Chitosan on Disease Control and Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestrius* L.) in a Forest Nursery. *Forests*, 2015, vol. 6, no. 9, pp. 3165–3176. <https://doi.org/10.3390/f6093165>

23. Zeller L., Ammer Ch., Annighöfer P., Biber P., Marshall J., Schütze G., del Río Gaztelurrutia M., Pretzsch H. Tree Ring Wood Density of Scots Pine and European Beech Lower in Mixed-Species Stands Compared with Monocultures. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 400, pp. 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.018>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

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

Научная статья

УДК 551.583.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-35-49

Радиальный прирост лиственницы даурской (*Lárix dahúrica* Turcz.) в условиях Станового нагорья

И.Л. Вахнина¹, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [P-3412-2018](https://orcid.org/0000-0001-5111-6255),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5111-6255>

Е.В. Носкова¹, канд. геогр. наук; *ResearcherID*: [J-3245-2018](https://orcid.org/0000-0001-9782-1996),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9782-1996>

В.С. Мыглан², д-р ист. наук; *ResearcherID*: [S-7088-2018](https://orcid.org/0000-0002-5268-653X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5268-653X>

¹Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН, а/я 1032, г. Чита, Россия, 672002; vahnina_il@mail.ru, elena-noskova-2011@mail.ru

²Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041; v.myglan@gmail.com

Поступила в редакцию 21.11.23 / Одобрена после рецензирования 19.02.24 / Принята к печати 20.02.24

Аннотация. Актуальность работы обусловлена важностью оценки устойчивости и продуктивности древостоев на верхней границе леса с учетом текущих климатических изменений. Такие оценки позволяют более точно определить ресурсный потенциал лесных экосистем с одной стороны и потенциал поглощения углерода для учета в климатической политике с другой. Целью работы является установление динамики линейных параметров годичного кольца лиственницы даурской в условиях верхней границы леса хребта Удокан (Становое нагорье). Для исследования параметров годичного кольца (ширины годичного кольца, ранней и поздней древесины) были использованы керны, отобранные с 41 дерева лиственницы даурской, произрастающей на 3 участках в лиственничном редколесье на высотах около 1500 м. Выполненный за период 1938–2021 гг. анализ метеорологических характеристик по данным ближайшей к отбору образцов метеостанции Чара выявил рост температуры воздуха во все сезоны года, продолжительности безморозного периода и количества периодов с температурами выше 0, 5, 10, 15 °С, сумм температур больше 5, 8, 10 и 15 °С на исследуемой территории. В результате проведенной работы впервые для верхней границы леса Станового нагорья построена обобщенная древесно-кольцевая хронология Char по параметрам годичных колец продолжительностью 513 лет, статистические показатели которой свидетельствуют о том, что динамика прироста характеризуется чувствительностью к внешним факторам среды. Дендроклиматический анализ, базирующийся на расчете коэффициентов корреляции Пирсона между индексами приростов рассматриваемых параметров годичных колец и климатическими факторами за 1938–2019 гг., выявил, что прирост лиственницы на территории Станового нагорья лимитируется преимущественно температурным режимом приземного воздуха. Наибольшие коэффициенты корреляции составили 0,49–0,50 (со среднеиюньской температурой воздуха); 0,41–0,49 (со средней температурой за июнь–июль, июль–август, июль–сентябрь); 0,52–0,53 (с максимальной температурой в июне); 0,45–0,52 (с максимальной температурой за июль–июль, июль–август, июль–сентябрь). Между суммами температур воздуха выше 5, 8, 10, 15 °С и индексами прироста также были обнаружены досто-

верные (при $p < 0,001$) корреляционные связи, наибольшие для сумм выше 15 °C и параметров годового кольца (0,43–0,45).

Ключевые слова: радиальный прирост, дендрохронология, годовое кольцо, верхняя граница леса, климат, температура воздуха, атмосферные осадки, Сибирь

Благодарности: Статья подготовлена в рамках исследований, финансируемых из средств бюджета учреждений, указанных в аффилиациях авторов.

Для цитирования: Вахнина И.Л., Носкова Е.В., Мыглан В.С. Радиальный прирост лиственницы даурской (*Lárix dahúrica* Turcz.) в условиях Станового нагорья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 35–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-35-49>

Original article

Radial Increment of Dahurian Larch (*Lárix dahúrica* Turcz.) in the Conditions of the Stanovoy Highlands

Irina L. Vakhnina[✉], Candidate of Biology; ResearcherID: [P-3412-2018](https://orcid.org/0000-0001-5111-6255),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5111-6255>

Elena V. Noskova¹, Candidate of Geography; ResearcherID: [J-3245-2018](https://orcid.org/0000-0001-9782-1996),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9782-1996>

Vladimir S. Myglan², Doctor of History; ResearcherID: [S-7088-2018](https://orcid.org/0000-0002-5268-653X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5268-653X>

¹Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Post Office Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; vahnina_il@mail.ru[✉], elena-noskova-2011@mail.ru

²Siberian Federal University, prosp. Svobodnyj, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; v.myglan@gmail.com

Received on November 21, 2023 / Approved after reviewing on February 19, 2024 / Accepted on February 20, 2024

Abstract. The relevance of the work is due to the importance of assessing the sustainability and productivity of forest stands at the upper forest line, taking into account current climate changes. Such assessments allow for a more accurate determination of the resource potential of forest ecosystems, on the one hand, and the carbon sequestration potential for consideration in climate policy, on the other. The aim of this research has been to establish the dynamics of the linear parameters of the annual ring of Dahurian larch in the conditions of the upper forest line of the Udokan Range (the Stanovoy Highlands). To study the parameters of the annual ring (annual ring width in the early and late wood), core samples have been taken from 41 Dahurian larch trees growing in 3 sites in larch sparse forests at altitudes of about 1500 m. An analysis of meteorological characteristics carried out for the period since 1938 till 2021 based on data from the Chara weather station closest to the sampling site has revealed an increase in air temperature in all seasons of the year, the duration of the frost-free period and the number of periods with temperatures above 0, 5, 10 and 15 °C, and the sum of temperatures greater than 5, 8, 10 and 15 °C in the study area. As a result of the work carried out, for the first time for the upper forest line of the Stanovoy Highlands, a generalized Char tree-ring chronology has been constructed based on the parameters of annual rings lasting for 513 years, the statistical indicators of which indicate that the dynamics of increment is characterized by sensitivity to external environmental factors. Dendroclimatic analysis, based on the calculation of the Pearson correlation coefficients between the increment indices of the considered

parameters of annual rings and climatic factors for 1938–2019, has revealed that the growth of larch in the territory of the Stanovoy Highlands is mainly limited by the temperature regime of the surface air. The highest correlation coefficient values have been 0.49–0.50 (with the average June air temperature); 0.41–0.49 (with the average temperature for June–July, June–August, and June–September); 0.52–0.53 (with the maximum temperature in June); 0.45–0.52 (with the maximum temperature for June–July, June–August and June–September). Significant (at $p < 0.001$) correlations have also been found between the sums of air temperatures above 5, 8, 10 and 15 °C and the growth indices, the largest for sums above 15 °C and annual ring parameters (0.43–0.45).

Keywords: radial increment, dendrochronology, annual ring, upper forest line, climate, air temperature, atmospheric precipitation, Siberia

Acknowledgements: The article was prepared as part of research funded from the budget of the institutions indicated in the authors' affiliations.

For citation: Vakhnina I.L., Noskova E.V., Myglan V.S. Radial Increment of Dahurian Larch (*Lárix dahúrica* Turcz.) in the Conditions of the Stanovoy Highlands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 35–49. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-35-49>

Введение

Лиственница даурская является основной лесообразующей породой, которая формирует современную верхнюю границу леса в условиях горно-таежной зоны Станового нагорья (Восточная Сибирь). Деревья здесь произрастают на пределе существования, в связи с этим их радиальный прирост весьма чувствителен к изменению факторов внешней среды. Ведущим лимитирующим фактором продуктивности древостоев в данных условиях, как правило, является температура приземного воздуха [3, 9, 19, 20, 22, 27].

Текущие климатические тенденции, обусловленные ростом температуры воздуха [21], свойственные и для исследуемого региона [12, 13], приводят к изменению лесорастительных условий, что сказывается на продуктивности древостоев, и смещению верхней границы леса вдоль высотного градиента [4, 8, 16, 26].

Радиальный прирост – это объективный показатель динамики факторов внешней среды. В качестве базовой характеристики радиального прироста в большинстве случаев рассматривается ширина годичных колец [3], производными от которой являются другие линейные параметры годичных колец – ширина ранней и поздней древесины [24]. Если такой параметр, как ширина годичных колец, позволяет оценить погодные условия в целом за период вегетации, то использование ширины ранней и поздней древесины дает возможность дифференцировать информацию о влиянии погодных условий на прирост древесины в разные периоды сезона вегетации [2, 18, 29].

На территории Станового нагорья дендрохронологические исследования ранее не проводились. Однако существует несколько работ, посвященных изучению изменчивости морфологических признаков лиственницы [1] и анализу химического состава ее хвои [10].

Цель исследования – оценить динамику линейных параметров годичного кольца лиственницы даурской в условиях верхней границы леса хребта Удокан (Становое нагорье).

Объекты и методы исследования

Территория исследования – отроги хребта Удокан (абсолютная высота – более 2500 м). Хребет расположен в центральной части Станового нагорья, представляющего собой горную систему Восточной Сибири, протяженную с запада на восток. В целом району присущи основные черты резко континентального климата [14]. Растительность Станового нагорья – это в основном лиственничная тайга, которая выше 1200 м переходит в предгорьцовое редколесье и каменистые гольцы [17].

В качестве материала для исследования служили образцы древесины лиственницы даурской (*Lárix dahúrica* Turcz.), отобранные в виде кернов в августе 2019 г. с 3 участков (1Мр, 3Мр, Fab), расположенных на склонах северо-восточной и северо-западной экспозиции на отрогах хребта Удокан (56° 38' с. ш. 118° 23' в. д., центральная часть Станового нагорья). Почвы территории исследования – мерзлотно-таежные. Участки заложены на высотах около 1500 м над ур. м. в сходных условиях местообитаний в лиственничном предгорьцовом редколесии (10Л) с пологом из *Pinus pumila* и *Betula middendorffii*. Средний диаметр деревьев составляет 28 см, высота – 17 м. Подрост отсутствует. Полнота насаждений – около 0,3. Средний диаметр ствола исследуемых деревьев на высоте 1,3 м равняется от 26 (1Мр) до 30 (Fab) см, высота – от 16 (1Мр) до 18 (Fab) м. На наибольшем расстоянии по прямой (около 5 км) находятся участки 1Мр и Fab, на наименьшем – 3Мр и Fab (около 2 км). Между участками 1Мр и 3Мр примерно 3 км.

Отбор кернов древесины производился с помощью бурава Пресслера на высоте ствола 1,3 м, так, чтобы буров проходил через центр ствола и захватывал центральные годовичные кольца. На каждом участке взято не менее 15 образцов. В камеральных условиях керны, содержащие реактивную древесину и пожарные подсушины, были исключены из дальнейшей работы. Удаление смол и дубильных веществ из образцов проводилось с помощью их предварительного вымачивания в ацетоне, экстракции под спиртовым паром и варки в дистиллированной воде. Более подробно методика работы описана на сайте Сибирской дендрохронологической лаборатории [15]. Получение изображений поверхности кернов выполнялось с использованием сканера Epson Perfection V850 Pro или микроскопа АХЮ zoom.V16. Измерение линейных параметров годовичных колец и графическое представление результатов осуществлялись в программах Coorecorder и CDendro [28]. Всего в рамках данной работы было измерено 3 параметра: ширина годовичного кольца (ШГК), ранней древесины (ШРД) и поздней (ШПД). Построение древесно-кольцевых хронологий, проверка их качества, устранение влияния возрастного тренда и других сигналов неклиматического характера на прирост (стандартизация) выполнялись в соответствии с общепринятыми дендрохронологическими методами, которые изложены в работе И.Л. Вахниной и др. [5]. Для создания древесно-кольцевых хронологий было использовано 41 модельное дерево (12 016 годовичных колец).

Анализ климатических показателей, характеризующих территорию исследования, был выполнен за 1938–2021 гг. по данным инструментальных наблюдений суточного и месячного разрешения ближайшей к отбору образцов (около 30 км по прямой) метеорологической станции Чара (координаты 56° 54' с. ш. 118° 16' в. д., высота над уровнем моря – 708 м). Гидротермический коэффи-

циент увлажнения Г.Т. Селянинова (ГТК) и индекс засушливости Д.А. Педя (SI) были рассчитаны по методикам, описанным ранее [6]. Для определения параметров линейных трендов многолетних изменений использован метод наименьших квадратов. Оценка значимости выявленных трендов выполнялась с применением t-статистики Стьюдента.

Полученные данные обработаны с использованием средств Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных метеостанции Чара показал, что среднегодовая температура приземного воздуха за 1938–2021 гг. составляла $-7,3$ °С, при этом самый низкий показатель отмечался в 1969 г. ($-9,8$ °С), самый высокий – в 2020 г. ($-4,9$ °С). В среднем за исследуемый период наиболее холодным месяцем стал январь ($-33,0$ °С), наиболее теплым – июль ($16,4$ °С), что показано на рис. 1. Продолжительность безморозного периода на территории исследования в среднем равна 74 дня. Последний заморозок приходится на 9 июня, первый – на 21 августа. Период с температурой воздуха выше 0 °С в среднем выпадает на промежуток времени с 27 апреля по 2 октября (158 дней), выше 5 °С – с 15 мая по 16 сентября (124 дня), выше 10 °С – со 2 июня по 31 августа (90 дней), выше 15 °С – с 25 июня по 4 августа (40 дней). Разница между среднемесячными максимальными температурами воздуха и средней за месяц варьировала от $5,9$ (в декабре) до $9,9$ (в феврале–марте) °С. В среднем за 1938–2021 гг. максимальная среднегодовая температура составляла $0,1$ °С, в летние месяцы изменялась от $20,6$ – $20,7$ °С в августе и июне до $23,6$ °С в июле. Сумма температур воздуха выше 5 °С в среднем за 84 года составляла 1593 °С, выше 8 °С – 1454 °С, выше 10 °С – 1318 °С, выше 15 °С – 772 °С.

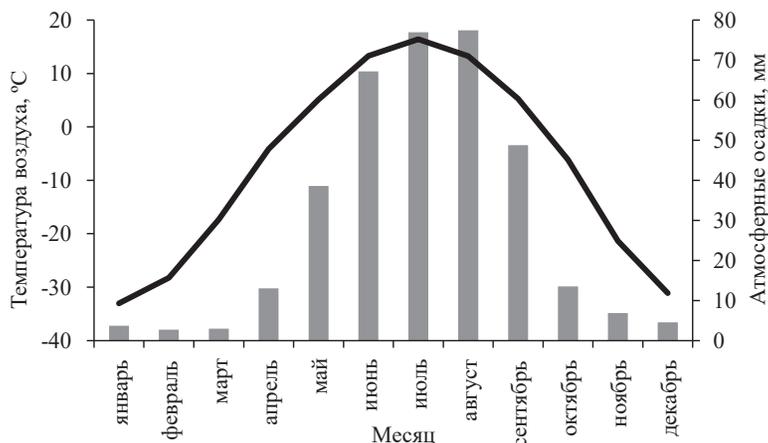


Рис. 1. Внутригодовой ход средней температуры воздуха и количества атмосферных осадков по данным метеорологической станции Чара в среднем за 1938–2021 гг.

Fig. 1. The intra-annual variation of average air temperature and precipitation according to the Chara weather station on average for 1938–2021

За исследуемый период среднегодовая температура воздуха достоверно повысилась на $0,24$ °С/10 лет. Линейные тренды для разных сезонов года за 10 лет составили зимой $0,36$ °С, весной – $0,29$ °С, летом – $0,16$ °С, осенью – $0,14$ °С. Тренды статистически достоверны при $p < 0,05$. Также наблюдается

увеличение продолжительности периодов с устойчивыми температурами воздуха выше 0, 5, 10 и 15 °С. Наибольший рост характерен для промежутка времени с температурой выше 15 °С. Безморозный период повысился на 4 дня за 10 лет. Суммы температур воздуха выше 5 °С за 10 лет выросли на 21 °С, выше 8 °С – на 22 °С, выше 10 °С – на 25 °С, выше 15 °С – на 29 °С. Тренды статистически достоверны при $p < 0,05$.

Количество атмосферных осадков за год в среднем составляет 356 мм. На теплое время года (май–сентябрь) приходится 86,7 % от их годовой суммы, а на июль–август – около 43,0 %. Наименьшее количество осадков за период исследования отмечалось в 1985 г. (178 мм), наибольшее – в 2012 г. (596 мм).

Анализ засушливости и увлажнения показал, что, в соответствии с классификацией гидротермического коэффициента увлажнения Г.Т. Селянинова, влагообеспеченность в Чаре оптимальна (ГТК = 1,33) и по классификации значений индекса Д.А. Педея условия увлажнения нормальные (SI = 0) [7]. Повышенная влагообеспеченность по ГТК (> 2,00) была свойственна 1981 и 2021 гг. По индексу засушливости Д.А. Педея лет с сильной и средней засухой (> 2,00) отмечено не было.

Условный (по количеству годовичных колец на высоте ствола 1,3 м) возраст лиственниц в среднем по участкам составляет 288 (1Мр), 238 (3Мр) и 350 (Fab) лет. Максимальный условный возраст деревьев – 513 (1Мр), 327 (3Мр) и 489 (Fab) лет. Измерение параметров годовичных колец показало, что их размеры связаны с возрастом (табл. 1). Средняя ширина годовичных колец исследуемых деревьев варьирует от 0,30 до 0,43 мм, ранней древесины – от 0,22 до 0,32 мм, поздней – от 0,08 до 0,12 мм.

Таблица 1

Статистические характеристики параметров годовичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан
The statistical characteristics of the parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range

Участок	Период, гг.	ШГК		ШРД		ШПД	
		$\bar{X} \pm SE$	max	$\bar{X} \pm SE$	max	$\bar{X} \pm SE$	max
1Мр	1507–2019	0,33±0,05	1,50	0,24±0,04	1,32	0,09±0,02	0,57
3Мр	1693–2019	0,43±0,07	2,08	0,32±0,05	1,82	0,12±0,02	0,86
Fab	1531–2019	0,30±0,04	2,58	0,22±0,03	1,81	0,08±0,01	1,13

Примечание: \bar{X} – среднее арифметическое; SE – стандартная ошибка среднего; max – максимальное значение.

В изменении ширины годовичных колец исследуемых лиственниц с помощью кластерного анализа были выделены группы деревьев, различающиеся по периодам интенсивного роста даже в пределах одного участка. Так, на участке 1Мр для одной группы деревьев период наибольшего прироста приходится на первые 50 лет, для другой выделяется 2 пика: 1-й – в начальные 20 лет, а 2-й – в 50–100-летний период. На участке 3Мр радиальный прирост большинства деревьев также характеризуется 2 периодами подъема: в первые 50 лет и в возрастном интервале 80–100 лет. Для 2 деревьев с участка 3Мр отмечается только 2-й период. На участке Fab также прослеживаются 2 группы деревьев с аналогичными для участка 3Мр временными отрезками интенсивного роста. Первое

увеличение прироста исследуемых лиственниц, вероятно, связано с «большим ростом», второе – с изменением локальных условий местопроизрастания. Несмотря на эти различия деревья в пределах одного участка характеризуются достаточно высокой межсерийной корреляцией для ширины годичных колец – 0,76, 0,78 и 0,75 для 1Мр, 3Мр, Fab соответственно. При достижении возраста 120–150 лет и более размеры годичных колец исследуемых деревьев имеют тенденцию к снижению.

Для устранения возрастного тренда и не связанных с влиянием климата изменений в приросте индивидуальные древесно-кольцевые хронологии были приведены к единству с помощью кубического сплайна и для каждого участка построены хронологии по 3 линейным параметрам годичных колец (рис. 2). Полученные индексы близки к 1. Их статистические характеристики свидетельствуют о наличии в динамике радиального прироста лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан, сигнала к условиям внешней среды (табл. 2). Коэффициенты чувствительности у стандартизированных древесно-кольцевых хронологий колеблются в пределах от 0,27 (по ширине поздней древесины для Fab) до 0,37 (по ширине ранней древесины для 3Мр), при этом для всех хронологий максимальные коэффициенты чувствительности характерны ширине ранней древесины. Стандартное отклонение варьирует в пределах от 0,26 (по ширине поздней древесины для Fab) до 0,41 (по тому же показателю для 1Мр). Автокорреляция 1-го порядка, отражающая влияние на радиальный прирост условий предшествующего года, находится в пределах от 0,16 (ширина ранней древесины для Fab) до 0,47 (ширина поздней древесины для 1Мр). Более низкими статистическими показателями отличается хронология Fab, при этом все полученные значения лежат выше пороговых, что свидетельствует о пригодности хронологий для дендроклиматического анализа [25]. Коэффициент вариации составляет от 25,4 до 36,8 %, т. е. уровень изменчивости повышен [11].

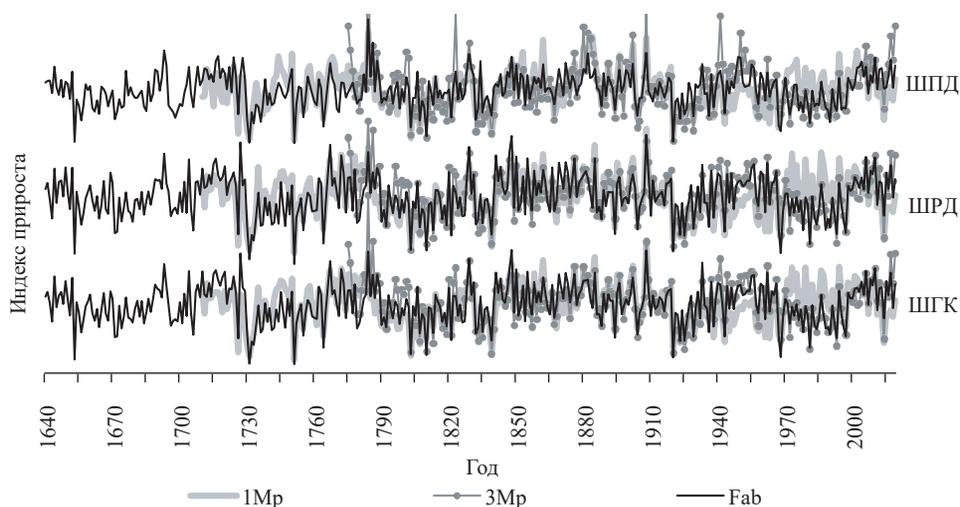


Рис. 2. Стандартизированные древесно-кольцевые хронологии по линейным параметрам годичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан, за периоды с $EPS \geq 0,85$

Fig. 2. The standardized tree-ring chronologies based on the linear parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range for periods with $EPS \geq 0.85$

Таблица 2

Статистические показатели стандартизированных древесно-кольцевых хронологий по параметрам годичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан
The statistical indicators of standardized tree-ring chronologies based on the parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range

Уча- сток	MS ШГК/ ШРД/ШПД	SD ШГК/ШРД/ ШПД	AC(1) ШГК/ ШРД/ШПД	Период с $EPS \geq 0,85$	Средний RBAR за период с $EPS \geq 0,85$	Cv, % ШГК/ШРД/ ШПД
1Мр	0,30/0,34/0,30	0,35/0,35/0,41	0,35/0,25/0,47	1710–2019 гг., 310 лет	0,55	28,6/29,8/28,2
3Мр	0,34/0,37/0,34	0,35/0,36/0,37	0,33/0,28/0,36	1775–2019 гг., 245 лет	0,61	31,9/31,4/36,8
Fab	0,31/0,35/0,27	0,29/0,32/0,26	0,19/0,16/0,27	1640–2019 гг., 380 лет	0,51	28,8/31,3/25,4

Примечание: MS – коэффициент чувствительности; SD – стандартное отклонение; AC(1) – коэффициент автокорреляции 1-го порядка; EPS – популяционный сигнал; RBAR – средний межсерийный коэффициент корреляции; Cv – коэффициент вариации.

Период, пригодный для анализа условий произрастания деревьев, определяли с помощью критерия выраженного сигнала популяции, который показывает степень отражения хронологией гипотетической, представленной бесконечным количеством деревьев [23]. Наибольшая продолжительность периода с $EPS \geq 0,85$ – 380 лет (1640–2019 гг.) – получена для древесно-кольцевой хронологии Fab, наименьшая – 245 лет (1775–2019 гг.) – для хронологии 3Мр. Межсерийный коэффициент корреляции за период с $EPS \geq 0,85$ в среднем варьирует от 0,51 (Fab) до 0,61 (3Мр).

Корреляционный анализ между линейными параметрами годичных колец древесно-кольцевых хронологий по каждому участку, выполненный за периоды с $EPS \geq 0,85$, свидетельствует, что наибольшая связь наблюдается между шириной годичного кольца и ранней древесины ($r = 0,98–0,99$). Между шириной годичного кольца и поздней древесины коэффициенты корреляции несколько ниже и составляют от 0,88 (Fab) до 0,91 (1Мр, 3Мр). Наименьшие, но достоверные корреляции получены для ширины ранней и поздней древесины – от 0,81 (3Мр) до 0,84 (Fab). Таким образом, наибольший вклад в формирование годичного кольца вносит ранняя древесина.

Общий период с $EPS \geq 0,85$, для которого можно проводить сравнительный анализ между хронологиями по разным участкам, составляет 245 лет (1775–2019 гг.). За этот период коэффициенты корреляции между хронологиями изменяются в пределах достоверных значений: по ширине годичных колец от 0,67 до 0,85, по ширине ранней древесины – от 0,68 до 0,86 и по ширине поздней древесины – от 0,64 до 0,77. При этом наименьшая корреляция между параметрами разных хронологий получена для 1Мр и 3Мр, наибольшая – для 3Мр и Fab. Такая закономерность характерна для всех 3 рассматриваемых показателей годичного кольца.

В связи с тем, что образцы были отобраны с деревьев, произрастающих в сходных местообитаниях, максимальное расстояние между участками не превышает 5 км, а корреляционные связи между ними статистически значи-

мы, это позволило объединить индивидуальные серии и создать обобщенную древесно-кольцевую хронологию Char для территории хребта Удокан (рис. 3), в которую вошла 41 индивидуальная серия прироста. Ее максимальная продолжительность составила 513 лет, охватывающих период с 1507 по 2019 гг. Статистические характеристики хронологии Char по разным параметрам годичного кольца несколько ниже, чем у хронологий по отдельным участкам, поскольку при обобщении в ней нивелировано влияние локальных (микrokлиматических) условий на радиальный прирост отдельных деревьев. Коэффициенты чувствительности для разных параметров годичного кольца находятся в пределах от 0,25 (ШПД) до 0,32 (ШРД), стандартное отклонение варьирует от 0,28 (ШПД) до 0,30 (ШРД), автокорреляция 1-го порядка изменяется от 0,20 (ШРД) до 0,35 (ШПД). За счет увеличения наполненности образцами обобщенной хронологии Char период с $EPS \geq 0,85$ был продлен до 385 лет (1635–2019 гг.), межсерийный коэффициент корреляции за данный промежуток времени в среднем составляет 0,50. Коэффициенты вариации для обобщенных по разным параметрам хронологий равняются от 29,1 (ШГК) до 30,3 (ШРД) %. Таким образом, динамика радиального прироста созданной обобщенной древесно-кольцевой хронологии Char содержит информацию об изменениях внешней среды, определяемых климатом, и может быть использована для его анализа за 385 лет.

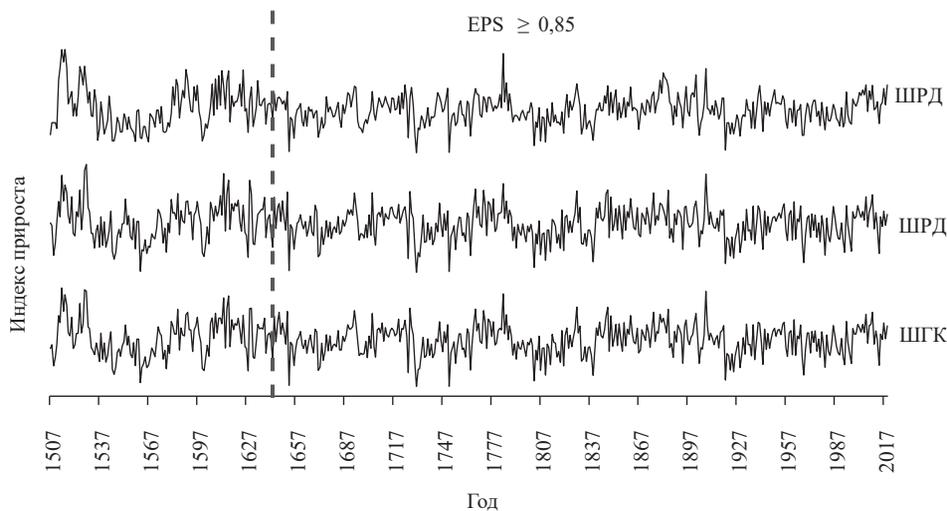


Рис. 3. Стандартизированная обобщенная древесно-кольцевая хронология Char по параметрам годичных колец лиственницы даурской, произрастающей на отрогах хребта Удокан. Вертикальной прерывистой линией отделен интервал с $EPS \geq 0,85$

Fig. 3. The standardized generalized Char tree-ring chronology based on the parameters of annual rings of Dahurian larch growing on the spurs of the Udokan Range.

The vertical dashed line separates the interval with $EPS \geq 0,85$

Анализ влияния климатических факторов на динамику рассматриваемых параметров годичного кольца хронологии Char за 1938–2019 гг. (82 года), выполненный с помощью расчета коэффициентов корреляции Пирсона, показал самые высокие значения (при $p < 0,001$) между индексами прироста по всем параметрам годичного кольца и характеристиками температурного режима приземного воздуха (среднегодовая и среднемесячная, максимальная среднемесячная температуры, суммы температур больше 5, 8, 10 и 15 °С).

Наибольшие коэффициенты корреляции получены между индексами всех параметров годичного кольца хронологии Char и среднеиюньской температурой воздуха ($r = 0,49-0,50$), а также со средней температурой за июнь–июль, июнь–август, июнь–сентябрь ($r = 0,41-0,49$) (рис. 4). Коэффициенты корреляции между всеми параметрами хронологии и максимальной температурой воздуха в июне достигают $0,52-0,53$, средними максимальными температурами за июнь–июль, июнь–август, июнь–сентябрь – $0,45-0,52$. Между суммами температур воздуха и индексами прироста также была выявлена достоверная (при $p < 0,001$) связь: между суммами температур больше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и шириной поздней древесины ($r = 0,34$), а также шириной годичного кольца ($r = 0,28$); суммами больше $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и всеми параметрами (от $0,32$ для ШРД до $0,37$ для ШПД); суммами больше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и всеми параметрами (от $0,34$ для ШГК, ШРД до $0,36$ для ШПД); суммами больше $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и всеми параметрами (от $0,43$ для ШРД до $0,45$ для ШПД).

При сглаживании 11-летним скользящим средним древесно-кольцевой хронологии и показателей температурного режима коэффициенты корреляции между ними значительно возрастают и достигают значений: $0,76$; $0,76$ и $0,83$ между ШПД и температурой воздуха за июнь и июль и период июнь–июль соответственно; $0,89$ между ШПД и максимальными температурами воздуха за июнь и июнь–июль; $0,79$ между ШПД и суммами температур больше $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

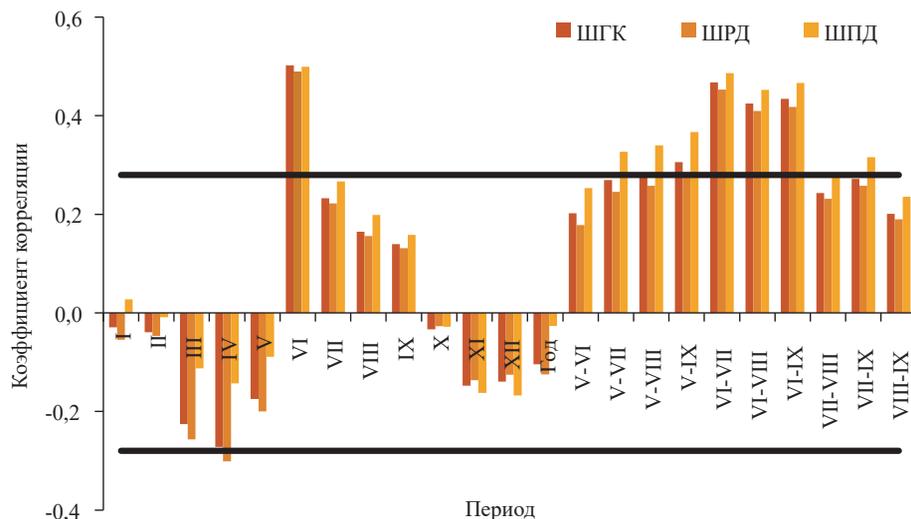


Рис. 4. Коэффициенты корреляции Пирсона между древесно-кольцевой хронологией Char и температурой приземного воздуха. Горизонтальными черными линиями показаны пороговые значения при $p < 0,001$

Fig. 4. Pearson correlation coefficients between the Char tree-ring chronology and surface air temperature. The horizontal black lines show the threshold values at $p < 0.001$

Связь радиального прироста хронологии Char с атмосферными осадками проявляется слабо (рис. 5). На все параметры годичного кольца оказывают отрицательное влияние осадки в июне (от $-0,23$ для ШПД до $-0,25$ для ШГК, ШРД; $p < 0,05$) и на ШГК и ШРД – сумма осадков за июнь–июль ($r = -0,24$ и $r = -0,25$; $p < 0,05$). Это, по всей вероятности, может быть связано с переувлажнением почв, вызванным сезонным оттаиванием мерзлоты.

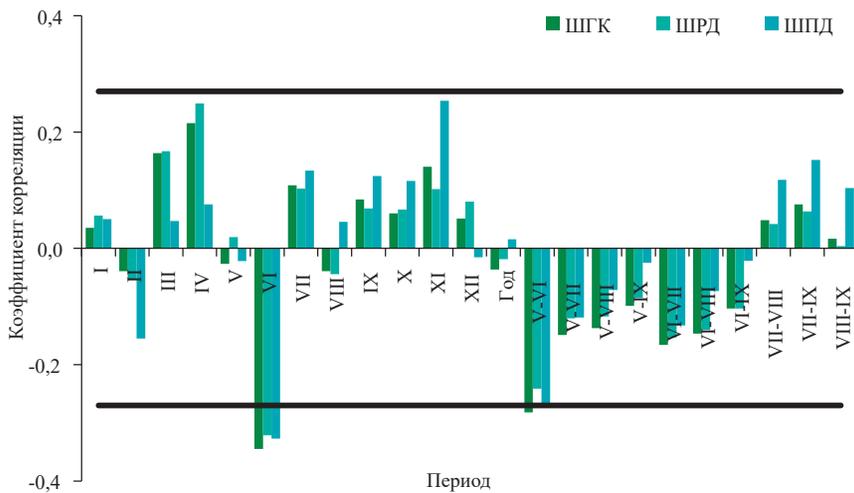


Рис. 5. Коэффициенты корреляции Пирсона между древесно-кольцевой хронологией Char и атмосферными осадками. Горизонтальными черными линиями показаны пороговые значения при $p < 0,05$

Fig. 5. Pearson correlation coefficients between the Char tree-ring chronology and atmospheric precipitation. The horizontal black lines show the threshold values at $p < 0.05$

Корреляционная связь между индексами параметров годичного кольца хронологии Char с индексами засухливости и увлажнения в большей степени (при $p < 0,001$) также проявляется с показателями за июнь и включающие его периоды. Между ГТК за июнь с индексами по всем параметрам годичного кольца коэффициенты корреляции составляют 0,45–0,46, между SI и приростом наибольшие значения (0,47–0,48, при $p < 0,001$) получены за июнь–июль (рис. 6).

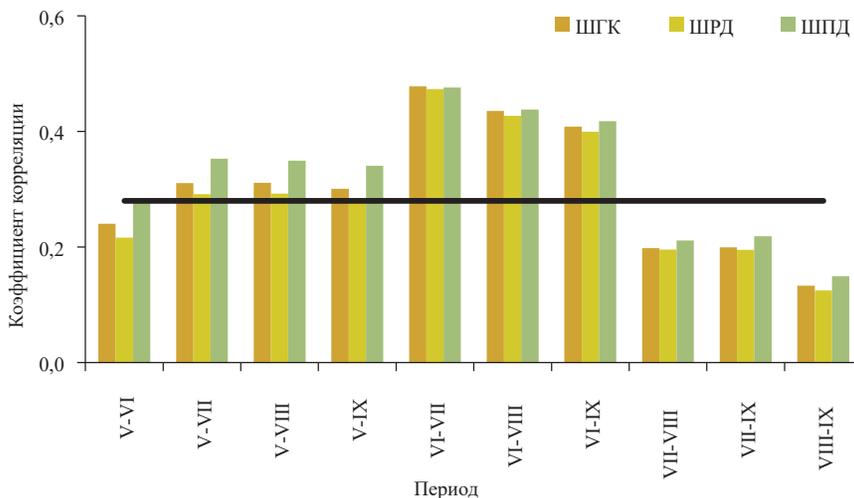


Рис. 6. Коэффициенты корреляции Пирсона между древесно-кольцевой хронологией Char и индексом засухливости Д.А. Педя. Горизонтальными черными линиями показаны пороговые значения при $p < 0,001$

Fig. 6. Pearson correlation coefficients between the Char tree-ring chronology and D.A. Ped' aridity index. The horizontal black lines show the threshold values at $p < 0.001$

Поскольку рассматриваемые индексы являются интегральными характеристиками температуры воздуха и атмосферных осадков, а территория исследования

характеризуется достаточным увлажнением, в выявленной связи радиального прироста с SI и ГТК ведущую роль играют температуры.

Заключение

Впервые для верхней границы леса хребта Удокан (Становое нагорье) построена обобщенная древесно-кольцевая хронология Chaг по 3 линейным параметрам годовых колец лиственницы даурской (ширины годового кольца, ранней и поздней древесины) продолжительностью 513 лет, пригодная для реконструкции условий произрастания за последние 385 лет (1635–2019 гг.).

Динамика радиального прироста лиственницы даурской в условиях верхней границы леса Станового нагорья лимитируется преимущественно температурой приземного воздуха. Достоверные коэффициенты корреляции получены между индексами прироста хронологии Chaг и характеристиками температурного режима: среднегодовой и среднемесячной температурами за отдельные месяцы и периоды сезона вегетации (июнь, июнь–июль, июль–август, июль–сентябрь), максимальной среднемесячной температурой, суммой температур больше 5, 8, 10 и 15 °С – с наибольшими их значениями, достигающими 0,53 между максимальной температурой воздуха в июне и шириной годового кольца и поздней древесины. Проявляется, хотя и слабо, значимая отрицательная связь рассматриваемых параметров годового кольца с суммой атмосферных осадков 1-й половины сезона вегетации (июнь, июль–август), вызванная, вероятно, переувлажнением почв, связанным с сезонным оттаиванием мерзлоты. Отклик параметров годового кольца на индексы засушливости и увлажнения за июль и включающие его периоды обусловлен ведущим значением температуры, поскольку эти индексы являются интегральными характеристиками температуры воздуха и атмосферных осадков.

Учитывая рост показателей температурного режима на исследуемой территории и их тесную связь с радиальным приростом, можно сделать вывод, что текущие климатические изменения положительно сказываются на продуктивности древостоев в условиях верхней границы леса Станового нагорья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барченков А.П. Изменчивость лиственницы в Северном Забайкалье (Становое нагорье) // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2008. № 3(4). С. 7–15.

Barchenkov A.P. Variability of Larch in Northern Transbaikalia (Stanovoe Plateau). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2008, no. 3(4), pp. 7–15. (In Russ.).

2. Ваганов Е.А., Терсков А.И. Анализ роста дерева по структуре годовых колец. Новосибирск: Наука, 1977. 94 с.

Vaganov E.A., Terskov A.I. *Analysis of Tree Growth by the Structure of Annual Rings*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 94 p. (In Russ.).

3. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.

Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Dendroclimatic Research in the Ural-Siberian Subarctic*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 246 p. (In Russ.).

5. Вахнина И.Л., Мыглан В.С., Носкова Е.В., Баринова В.В., Тайник А.В. Региональные особенности радиального прироста сосны обыкновенной в климатических ус-

ловиях лесостепной и степной зон Восточного Забайкалья по многопараметрическим древесно-кольцевым хронологиям // Сиб. экол. журн. 2022. Т. 29, № 2. С. 147–161.

Vakhnina I.L., Myglan V.S., Noskova E.V., Barinov V.V., Tainik A.V. Regional Features of the Radial Growth of Scots Pine under Climatic Conditions of the Forest-Steppe and Steppe Zones of Eastern Transbaikalia According to Multiparameter Tree-Ring Chronologies. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2022, vol. 15, pp. 118–128. <https://doi.org/10.1134/S199542552202010X>

6. Вахнина И.Л., Обязов В.А., Замана Л.В. Динамика увлажнения в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья с начала XIX столетия по кернам сосны обыкновенной // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2018. № 2. С. 28–33.

Vakhnina I.L., Obyazov V.A., Zamana L.V. Dynamics of Humidification in the Steppe Zone of Southeastern Transbaikalia Since the Beginning of the 19th Century Evidenced by the Cores of Scots Pine. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* = Lomonosov Geography Journal, 2018, no. 2, pp. 28–33. (In Russ.).

4. Воронин В.И., Осколков В.А., Буянтуев В.А., Сизых А.П. Тенденции динамики верхней границы леса в высокогорьях Северного Прибайкалья // Сиб. лесн. журн. 2016. № 4. С. 77–85.

Voronin V.I., Oskolkov V.A., Buyantuev V.A., Szykh A.P. Trends in Dynamics of Forest Upper Boundary in High Mountains of Northern Baikal Area. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 4, pp. 77–85. (In Russ.).

7. Галимова Р.Г., Переведенцев Ю.П., Яманаев Г.А. Агроклиматические ресурсы республики Башкортостан // Вестн. Воронежск. Гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. 2019. № 3. С. 29–39.

Galimova R.G., Perevedentsev Yu.P., Yanaev G.A. Agro-Climatic Resources of the Republic of Bashkortostan. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoeology, 2019, no. 3, pp. 29–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geo.2019.3/2321>

8. Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. 2019. № 4. С. 243–254.

Grigor'ev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., V'yukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. Structure and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2019, vol. 50, pp. 311–322. <https://doi.org/10.1134/S1067413619040076>

9. Гурская М.А. Хронологии светлых колец лиственницы на севере сибирской лесотундры: отражение степени континентальности климата // Изв. РАН. Сер.: Геогр. 2021. Т. 85, № 1. С. 84–96.

Gurskaya M.A. Chronology of Larch Light Rings in the North of Siberia: Reflection of the Climate Continentality Degree. *Izvestiya Rossiyskoj akademii nauk. Seriya: Geograficheskaya*, 2021, vol. 85, no. 1, pp. 84–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556621010064>

10. Макаров В.П., Борзенко С.В., Помазкова Н.В., Желибо Т.В. Особенности накопления химических элементов в хвое лиственницы Гмелина, произрастающей в районе Удоканского месторождения меди // Химия растит. сырья. 2021. № 2. С. 191–200.

Makarov V.P., Borzenko S.V., Pomazkova N.V., Zhelibov T.V. Features of the Content of Chemical Elements in the Coniferous Larch Gmelina in the Area of the Udokan Copper Deposit. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 2, pp. 191–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028832>

11. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1972. 283 с.

Мамаев S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 283 p. (In Russ.).

13. Носкова Е.В., Вахнина И.Л. Устойчивые переходы температуры воздуха в весенний и осенний периоды в Восточном Забайкалье // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 148–161.

Noskova E.V., Vakhnina I.L. The Influence of Alluvial Gold Mining on the Natural Complexes of River Valleys of Amur River Basin in Eastern Transbaikalia. *Geosfernyye issledovaniya* = Geosphere Research, 2022, no. 3, pp. 148–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/24/10>

12. Носкова Е.В., Вахнина И.Л. Анализ современных пространственно-временных изменений температуры воздуха в Забайкальском крае // Геогр. вестн. 2023. № 1(64). С. 116–126.

Noskova E.V., Vakhnina I.L. Analysis of Modern Spatio-Temporal Changes in Air Temperature in the Trans-Baikal Territory. *Geograficheskij vestnik* = Geographical Bulletin, 2023, no. 1(64), pp. 116–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-1-116-126>

14. Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Голятина М.А. Изменение климата читинского участка зоны БАМ // Аспирант. Приложение к журн. Вестн. Забайкальск. гос. ун-та. 2018. Т. 12, № 2. С. 61–65.

Noskova E.V., Vakhnina I.L., Golyatina M.A. Climate Change of the Chita Site of the BAM Zone. *Aspirant. Prilozhenie k zhurnalu "Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta"*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 61–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2074-9155-2018-12-2-61-65>

15. Обработка материалов. Режим доступа: <https://www.sibdendro.com/obrabotka-materiala> (дата обращения: 18.07.23).

Materials Processing. (In Russ.).

16. Петров И.А., Шушпанов А.С., Голюков А.С., Двинская М.Л., Харук В.И. Динамика древесно-кустарниковой растительности в горной лесотундре Восточного Саяна // Экология. 2021. № 5. С. 372–379.

Petrov I.A., Shushpanov A.S., Golyukov A.S., Dvinskaya M.L., Kharuk V.I. Dynamics of Tree and Shrub Vegetation in the Eastern Sayan Mountain Tundra. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2021, vol. 52, pp. 399–405. <https://doi.org/10.1134/S1067413621050118>

17. Пешкова Г.А. Растительность Сибири. Предбайкалье и Забайкалье. Новосибирск: Наука, 1985. 145 с.

Peshkova G.A. *Vegetation of Siberia. Pre-Baikal and Transbaikal*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 145 p. (In Russ.).

18. Румянцев Д.Е., Епишков А.А. Биологические основы изменчивости годичных колец // Фундамент. исслед. Биологические науки. 2015. № 2. С. 481–486.

Rumyantsev D.E., Epishkov A.A. Biological Basis of Variability of Annual Rings. *Fundamental'nyye issledovaniya. Biologicheskie nauki* = Fundamental Research. Biological Sciences, 2015, no. 2, pp. 481–486. (In Russ.).

19. Сидорова О.В., Ваганов Е.А., Наурызбаев М.М., Шишов В.В., Хьюс М.К. Региональные особенности радиального прироста лиственницы на севере средней Сибири по тысячелетним древесно-кольцевым хронологиям // Экология. 2007. № 2. С. 99–103.

Sidorova O.V., Vaganov E.A., Naurzbaev M.M., Shishov V.V., Hughes M.K. Regional Features of the Radial Growth of Larch in North Central Siberia according to Millennial Tree-Ring Chronologies. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2007, vol. 38, pp. 90–93. <https://doi.org/10.1134/S106741360702004X>

20. Тайник А.В., Мыглан В.С., Баринов В.В., Ойдунаа О.Ч., Назаров А.Н. Прирост лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на верхней границе леса в Республике Тыва // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 91–99.

Tainik A.V., Myglan V.S., Barinov V.V., Oidupaa O.Ch., Nazarov A.N. Growth of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) at the Upper Forest Line in the Republic of Tyva. *Geografiya i prirodnyye resursy* = Geography and Natural Resources, 2015, no. 2, pp. 91–99. (In Russ.).

21. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание «Наукоемкие технологии», 2022. 124 с.

The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General Summary. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022. 124 p. (In Russ.).

22. Фонти М.В., Тычков И.И., Чуракова (Сидорова) О.В. Внутрисезонный климатический сигнал в годовых кольцах хвойных деревьев в криолитозоне Сибири // Экология. 2021. № 5. С. 380–387.

Fonti M.V., Tychkov I.I., Churakova (Sidorova) O.V. Intraseasonal Climatic Signal in Tree Rings of Conifers in the Permafrost Zone of Siberia. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*, 2021, vol. 52, pp. 412–418. <https://doi.org/10.1134/S1067413621050064>

23. Cook E., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V., Jones P.D. Data Analysis. *Methods of Dendrochronology*. Dordrecht, Springer, 1990, pp. 97–162. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0_3

24. Cook E.R., Kairiukstis L.A. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990. 394 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>

25. Ferguson C.W. A 7104-Year Annual Tree-Ring Chronology for Bristlecone Pine, *Pinus Aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bulletin*, 1969, vol. 29, no. 3-4, pp. 3–29.

26. Kirilyanov A.V., Hagedorn F., Knorre A.A., Fedotova E.V., Vaganov E.A., Naurzbaev M.M., Moiseev P.A., Rigling A. 20th Century Tree-Line Advance and Vegetation Changes along an Altitudinal Transect in the Putorana Mountains, Northern Siberia. *Boreas*, 2012, vol. 41, iss. 1, pp. 56–67. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x>

27. Kirilyanov A.V., Treydte K.S., Nikolaev A., Helle G., Schleser G.H. Climate Signals in Tree-Ring Width, Density and $\delta^{13}\text{C}$ from Larches in Eastern Siberia (Russia). *Chemical Geology*, 2008, vol. 252, iss. 1–2, pp. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.01.023>

28. Larsson L. CooRecorder and Cdendro Programs of the CooRecorder. *Cdendro Package Version 9.1*, 2018. Available at: <https://www.cybis.se/forfun/dendro/helpcoorecorder7/index.htm> (accessed 18.07.23).

29. Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1984, vol. 23, iss. 2, pp. 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2)

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

Научная статья

УДК 630*232.11*634.17(571.513)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-50-63

Биолого-морфологическая характеристика видов рода *Crataegus* L. в дендрарии Хакасии

Г.Н. Гордеева, канд. биол. наук; ResearcherID: [AAH-2491-2021](https://orcid.org/0000-0002-9225-3659),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9225-3659>

Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии – филиал Красноярского научного центра СО РАН, ул. Садовая, д. 5, с. Зеленое, Усть-Абаканский р-н, Республика Хакасия, Россия, 655132; gordeeva.gal2011@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.02.24 / Одобрена после рецензирования 06.05.24 / Принята к печати 07.05.24

Аннотация. Во флоре Хакасии встречается один вид боярышника – *Crataegus sanguinea* Pall., его плоды используются в качестве лекарственного сырья. Больших зарослей он не образует, в то время как сырье имеет высокий спрос. Следовательно, внедрение новых видов боярышника актуально. Цель работы – установление ритма развития боярышников дендрария в современных условиях, выявление перспективных видов для применения в озеленении в степной зоне Хакасии. Коллекция боярышника в дендрарии Научно-исследовательского института аграрных проблем Хакасии включает 21 вид. Из них североамериканского происхождения – 42,8 %, по 19,1 % видов с Дальнего Востока и из Средней Азии, 9,4 % – из Европы, 4,8 % – из Восточной Азии. Средний возраст растений составил $40,6 \pm 1,3$ лет. Для условий сухой степи такой возраст является значительным. На основе статистической обработки фенологических данных за последние 10 лет определен ритм роста и развития коллекции боярышника. Установлены периоды вегетации, цветения, плодоношения и листопада. Определены суммы эффективных температур, необходимых в весенне-летний период развития растений. Составлен календарь цветения боярышников. Большая часть видов североамериканского и все среднеазиатского происхождения зацветают в одинаковые сроки. Выделено 42,8 % боярышников, которые по срокам прохождения этапов вегетации полностью укладываются в период для местных растений, 57,2 % являются длительно вегетирующими. Пик цветения боярышников дендрария приходится на 19–28 мая, средняя продолжительность цветения составила 9 дней. В результате все рассматриваемые виды являются вполне перспективными для выращивания в условиях степной зоны Хакасии. 28,5 % видов характеризуются как вегетативно-подвижные, для остальных свойственно семенное размножение. Такие виды, как *Crataegus songarica* C. Koch. и *C. arnoldiana* Sarg., с плодами хорошего вкусового качества, предложены для использования в плодовом садоводстве. Виды, имеющие раскидистые кроны, могут быть распространены в качестве солитеров при озеленении населенных пунктов степной зоны Хакасии. Засухоустойчивые боярышники подходят для создания высоких живых изгородей.

Ключевые слова: Хакасия, степная зона, дендрарий, виды боярышника, способы размножения, ритм роста, ритм развития, период цветения

Для цитирования: Гордеева Г.Н. Биолого-морфологическая характеристика видов рода *Crataegus* L. в дендрарии Хакасии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 50–63. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-50-63>

Original article

Biological and Morphological Characteristics of Species of the Genus *Crataegus* L. in the Arboretum of Khakassia

Galina N. Gordeeva, Candidate of Biology; ResearcherID: [AAH-2491-2021](https://orcid.org/0000-0002-9225-3659),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9225-3659>

Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia – Branch of Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sadovaya, 5, Zelenoe Village, Ust-Abakansky District, Republic of Khakassia, 655132, Russian Federation; gordeeva.gal2011@yandex.ru

Received on February 12, 2024 / Approved after reviewing on May 6, 2024 / Accepted on May 7, 2024

Abstract. In the flora of Khakassia, there is one species of hawthorn – *Crataegus sanguinea* Pall., its fruits are used as medicinal raw materials. It does not form large thickets, while the raw material is in high demand. Therefore, the introduction of new species of hawthorn is relevant. The aim of the research has been to establish the rhythm of development of the arboretum hawthorns in modern conditions, as well as to identify promising species for use in landscaping in the steppe zone of Khakassia. The hawthorn collection in the arboretum of the Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia includes 21 species. Of these, 42.8 % are of North American origin, 19.1 % of species are from the Far East and Central Asia, 9.4 % are from Europe, and 4.8 % are from East Asia. The average age of the plants has been 40.6 ± 1.3 years. This age is considerable for the conditions of the dry steppe. Based on statistical processing of phenological data over the past 10 years, the rhythm of growth and development of the hawthorn collection has been determined. The periods of vegetation, flowering, fruiting and leaf fall have been established. The sums of effective temperatures required in the spring-summer period of plant development have been determined. A calendar of hawthorn flowering has been compiled. Most species of North American and all of Central Asian origin bloom at the same time. 42.8 % of hawthorns have been identified, which, in terms of the timing of the stages of vegetation, fully fit into the period for local plants, 57.2 % have a long vegetation period. The peak flowering of the arboretum's hawthorns falls on May 19–28, with an average flowering period of 9 days. As a result, all the species under consideration are quite promising for cultivation in the conditions of the steppe zone of Khakassia. 28.5 % of species are vegetatively mobile, while the rest are characterized by seed reproduction. Species such as *Crataegus songarica* C. Koch. and *C. arnoldiana* Sarg., with fruits of good taste quality, are proposed for use in fruit gardening. Species with spreading crowns can be distributed as solitaires in landscaping settlements in the steppe zone of Khakassia. Drought-resistant hawthorns are suitable for creating tall hedges.

Keywords: Khakassia, steppe zone, arboretum, hawthorn species, methods of reproduction, rhythm of growth, rhythm of development, flowering period

For citation: Gordeeva G.N. Biological and Morphological Characteristics of Species of the Genus *Crataegus* L. in the Arboretum of Khakassia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 50–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-50-63>

Введение

Виды растений, которые сочетают в себе такие качества, как декоративность в течение всего вегетационного периода, возможность практического использования в качестве живых изгородей и плодоношение, немногочисленны. Род боярышника (*Crataegus* L.) – один из древнейших представителей семейства розоцветных – относится к данным растениям. Боярышники произрастали на Земле еще в меловой период мезозойской эры, но больше всего они распространились в третичный период. Боярышники легко образуют межвидовые гибриды, некоторые систематики выделяют такие гибриды как отдельные виды [16].

Род *Crataegus* включает около 250–300 видов и является одним из самых крупных и таксономически трудных в семействе Rosaceae Juss., поэтому неоднократно привлекал интерес ботаников. Тем не менее многие вопросы номенклатуры, систематики и географии рода в целом и отдельных видов в частности остаются неясными [19, 20, 22, 28].

Ареал рода достаточно широк, северная граница достигает до 60° с. ш. Северной Америки и Евразии. На территории России северная граница ареала проходит по территории Нижегородской области, пересекает Средний Урал. В западном Зауралье она лежит южнее 60° с. ш., а затем огибает с севера Новосибирскую область и пересекает р. Обь в средней части Томской области [1].

В СССР крупнейшим специалистом по систематике рода в Восточном полушарии была А.И. Полякова, система рода которой признана многими ботаниками России и стран СНГ [12]. Обобщил знания по боярышникам флоры Америки канадский ботаник J.B. Phipps [25, 26]. В настоящее время Р.А. Уфимов [13] на основе данных молекулярной генетики [21] предложил деление рода боярышника Восточной Европы и Кавказа на 3 подрода: 1) *Crataegus* L., к которому отнесены виды, произрастающие в Европе, Западной и Средней Азии (секции *Crataegus* и близкие к ней); 2) *Sanguineae* Ufimov – виды секции *Sanguineae*, распространенные в Средней, Северной и Восточной Азии, и виды секции *Douglasii*, ареалы которых приурочены к западной части Северной Америки; 3) *Americanae* El Gazzar – виды восточной части Северной Америки. Секции разделены на подсекции и ряды.

Среди боярышников встречаются как засухоустойчивые виды – ксерофиты (*C. orientalis*, *C. pontica*, *C. turkestanica*), так и требующие значительной влажности почвы (*C. dahurica*, *C. maximowiczii*, *C. chlorosarca*, *C. sanguinea* и др.). Изучение видов данного рода и возможности их интродукции проводилось во многих ботанических садах и дендрариях разных регионов. Перспективность использования видов боярышников оценивалась многими исследователями: Н.И. Лиховид [7], Б.А. Кентбаева [6], М.В. Фирсова [15], V.D. Strelets et al. [27], В.В. Петрик и др. [11], А.А. Винокуров [3], Ю.В. Александрова [1] и др. На сложность их разведения указывают многие авторы [2, 14, 17, 18, 23, 24].

Во флоре Хакасии известен один вид боярышника – *Crataegus sanguinea* Pall., произрастающий в лесостепной и степной зонах республики. Плоды используются населением в качестве лекарственного сырья при сердечно-сосудистых заболеваниях. Естественных обильных зарослей этот вид не образует,

поэтому актуально введение в культуру новых видов боярышника, которые дополнят и сделают разнообразным ассортимент.

В дендрарии Научно-исследовательского института аграрных проблем Хакасии Н.И. Лиховид собрала богатую коллекцию боярышника. Прошли испытание более 50 видов этого рода, 38 – изучались более подробно. Все они характеризовались хорошей зимостойкостью, ежегодно проходили все фазы роста и развития, за исключением молодых растений. Разработаны рекомендации по выращиванию видов боярышника [2], из них 17 – возможно применять для зеленого строительства [7]. По истечении более 20 лет наблюдалось изменение численности видового состава коллекции боярышника. Также претерпевал изменение и климат региона. Установлено, что на территории Республики Хакасии с 1941 по 2000 гг. произошло повышение среднегодовой температуры воздуха на 0,02 °С/год – в лесостепи и на 0,04 °С/год – в настоящей степи. В целом климат в Хакасии за 60 лет потеплел на 1,2 °С, особенно за последние 20 лет [4].

Цель работы – установление ритма развития боярышников дендрария в современных условиях, выявление перспективных для внедрения в озеленение в степной зоне Хакасии.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является коллекция боярышника дендрария института, включающая 21 вид: *Crataegus×almaatensis* A. Pojark., *C. bretschnideri* C.K. Schneid., *C. dahurica* Koehne, *C. chlorosarca* Maxim., *C. chlorocarpa* Lenne et C. Koch., *C. maximowiczii* C.K. Schneid., *C. nigra* (Waldst. et Kit.), *C. remotilobata* H. Raik., *C. tianschanica* A. Pojark., *C. rusanovii* Cin., *C. pinnatifida* Bge., *C. arnoldiana* Sarg., *C. mollis* (Torr. Et Gray) Schelle, *C. flabellata* (Bosc) C. Koch, *C. calpodendron* (Ehrh.) Medik., *C. douglasii* Lindl., *C. punctata* Jacq., *C. faxonii* Sarg., *C. monogyna* Jacq., *C. rivularis* Nutt., *C. songarica* C. Koch.

Для установления ритма роста и развития изучаемых видов проводились фенологические наблюдения по методике З.И. Лучник [9], в которой учитывались фенофазы: начала развития вегетативных и генеративных почек, появления первого настоящего листа, начала и конца цветения, завершения роста побегов, созревания и опадения плодов, появления осенней окраски листьев, начала и конца листопада. Перспективность определяли по адаптированной к условиям региона методике Н.И. Лиховид [8]. Учитывали 7 характеристик, где на 1-е место поставлена степень одревеснения побегов как основного показателя зимостойкости растений, что является главным в условиях места интродукции: степень одревеснения побегов, зимостойкость, сохранение габитуса, побегообразовательную способность, наличие прироста, репродуктивную способность, способы размножения. Биометрические параметры взрослых растений боярышника обрабатывались при помощи вариационной статистики с применением пакета программ Snedecor [12], брали фенологические данные за 10-летний период (2011–2021 гг.), даты наступления фенофаз переводили в непрерывный ряд чисел по методике Г.Н. Зайцева [5], варибельность признаков оценивалась по шкале С.А. Мамаева [10]. В связи с небольшим количеством осадков (300–320 мм) в год, выпадающих в степной зоне Хакасии, растения выращивались при обязательном поливе.

Результаты исследования и их обсуждение

На 2005 г. коллекция боярышников в дендрарии, по предварительным данным, включала 28 видов разного происхождения. За последние годы выпало 7 видов: *C. jozana* Schneid., *C. schroederi* Koehne, *C. submollis* Sarg., *C. pedicillata* Sarg., *C. knorringiana* A. Pojark., *C. turkestanica* A. Pojark., *C. prunifolia* (Marsh.) Pers.

Средний возраст боярышников в коллекции составляет 40 лет с пределами от 22 до 55. Большинство видов имеют североамериканское происхождение – 42,8 %, 19,1 % характеризуются ареалами на Дальнем Востоке, 14,3 % – из Средней и Восточной Азии, 9,5 % – из Европы. Боярышники в дендрарии представлены небольшими (*C. mollis*, *C. arnoldiana*) или высокими (*C. tianschanica*, *C. fischerii* и *C. flabellate*) деревьями с 1 или 3 стволами. У некоторых широкие раскидистые кроны, достигающие в диаметре до 6,0 м при диаметре ствола до 14–16 см (*C. nigra*, *C. songarica*, *C. tianschanica*) (табл. 1). Высота растений, как правило, меньше, чем в природных местообитаниях.

Таблица 1

Биолого-морфологическая характеристика видов боярышника в дендрарии
The biological and morphological characteristics of hawthorn species in the arboretum

Вид	Происхождение	Экземпляров, шт.	Возраст, лет	Высота растений, м	Диаметр		Способы размножения
					кроны, м	ствола, см	
<i>Crataegus × almaatensis</i>	Средняя Азия	2	44	5,0	4,5	12,0	Семенами
<i>C. arnoldiana</i>	Северная Америка	5	22	3,3	2,5	2,5–5,3	
<i>C. brettschneideri</i>	Китай	2	37	5,5–6,0	3,0–4,0	9,0–12,0	
<i>C. calpodendron</i>	Северная Америка	2	33	3,2	3,0	7,3	
<i>C. chlorocarpa</i>		2	42	6,0	5,0	9,0–15,0	Семенами, корневыми отпрысками
<i>C. chlorosarca</i>	Дальний Восток	1	43	3,5	3,5	6,0	Семенами
<i>C. dahurica</i>	Восточная Сибирь, Дальний Восток	2	43	3,5	3,5	14,0–16,0	
<i>C. douglasii</i>	Северная Америка	2	41	2,5	1,5	2,5	
<i>C. faxonii</i>		1	33	4,5	6,0	13,0	
<i>C. flabellata</i>		2	43	5,0	4,0	19,0	
<i>C. maximo-wiczii</i>	Восточная Сибирь, Дальний Восток	2	55	3,5	4,0	12,0	
<i>C. mollis</i>	Северная Америка	1	43	2,0	1,0	4,0	
<i>C. monogyna</i>	Европа, Кавказ	2	43	6,0	4,5	9,0	Семенами, корневыми отпрысками
<i>C. nigra</i>	Западная Европа	2	40	5,5	3,5	11,0–12,0	Семенами, корневыми отпрысками

Окончание табл. 1

Вид	Происхождение	Экземпляров, шт.	Возраст, лет	Высота растений, м	Диаметр		Способы размножения
					кроны, м	ствола, см	
<i>C. pinnatifida</i>	Дальний Восток, Корея, Китай	4	43	3,0	2,5	11,0–12,0	Семенами
<i>C. punctata</i>	Северная Америка	1	38	4,5–5,0	6,0	9,0–10,0	
<i>C. remotilobata</i>	Средняя Азия	2	42	3,5	2,0	3,5	Семенами, корневыми отпрысками
<i>C. rivularis</i>	Северная Америка	2	41	3,3	3,0	7,5	Семенами
<i>C. rusanovii</i>	Дальний Восток	2	42	4,5	4,0	10,0–12,0	Семенами, корневыми отпрысками
<i>C. songarica</i>	Средняя Азия	5	41	4,5	5,0	14,0	Семенами, корневыми отпрысками
<i>C. tianschanica</i>		1	45	5,5	3,5	10,3	Семенами

Примечание: Перспективность всех видов – по 1 баллу.

Все изучаемые виды боярышника формируют семена, но самосев боярышников в дендрарии отсутствует. 28,5 % видов образуют корневые отпрыски, что значительно облегчает размножение.

Исследование закономерностей роста и развития интродуцированных видов в новых экологических условиях имеет важное значение для оценки перспективности экзотов и является основой для возможности дать заключение о результате интродукции конкретного вида [5]. Большинство наблюдаемых боярышников (91,4 %) проходят все фазы роста и развития. В отдельные годы не цветет *Crataegus mollis*, *C. maximowiczii* цветет ежегодно, но плодоносит не каждый год, скорее всего, сказывается местоположение данного вида в дендрарии, открытое сильным ветрам. Развитие вегетативных почек видов начинается во 2–3-й декадах апреля (у 52,4 %), при сумме эффективных температур 46,1–70,6 °С (*Crataegus almaatensis*, *C. arnoldiana*, *C. chlorosarca*, *C. douglasii* и др.) (табл. 2). Развитие генеративных почек происходит в 1-ю декаду мая у 95,2 % видов боярышника при сумме эффективных температур от 196,8 °С и выше (*Crataegus almaatensis*, *C. faxonii*, *C. douglasii*, *C. brettschneideri* и др.). Во 2-й декаду мая появляются бутоны у *C. mollis* при сумме эффективных температур 300–320 °С.

Период цветения растений определяет сроки сбора цветков с целью заготовки лекарственного сырья, знание дат протекания этого периода также необходимо для составления декоративных групп при благоустройстве территорий. По срокам зацветания изучаемые виды разделены на 2 группы. Для 14,3 % видов цветение приходится на 2-ю декаду мая, когда сумма эффективных температур накапливается от 281 до 320 °С. Во 2-ю группу вошли виды, для которых эта фаза начинается в 3-й декаду мая (76,2 %) при суммах эффективных температур от 397,1 до 424,1 °С. Последние значения суммы эффективных температур оказались необходимы для зацветания *C. pinnatifida*. Позднее всех вступают в данную фазу развития *C. remotilobata* и *C. songarica* – в 1-й декаду июня при сумме эффективных температур 673,5 и 713,2 °С соответственно.

Таблица 2

Фенологическое развитие боярышников в дендрарии
The phenological development of hawthorns in the arboretum

Вид	Развитие почек		Развер- тывание насто- ящего листа	Окоча- ние роста побегов	Цветение		Созре- вание плодов	Появление осенней окраски листьев	Листопад		Продолжительность, дни	
	вегета- тивных	генера- тивных			начало	конец			начало	конец	цветения	вегетации
<i>Crataegus × almaatensis</i>	18.04±2 12,5	8.05±2 15,3	10.05±1 5,1	13.06±6 12,1	18.05 ±3 8,8	27.05±2 7,1	15.08±5 7,0	15.08±4 6,8	16.09±1 3,9	19.10±6 10,5	10±1 19,9	165±8 10,6
<i>C. arnoldiana</i>	16.04±2 7,3	10.05±2 11,2	12.05±1 4,8	12.06±6 11,1	18.05±5 8,6	26.05±6 10,2	19.09±3 3,5	26.09±9 10,0	8.10±3 3,9	20.10±1 1,0	9±1 25,5	186±2 2,6
<i>C. bretschneideri</i>	15.1 15,1	10.05±1 4,1	14.05±1 5,2	11.06±6 12,4	18.05±3 8,9	30.05±3 7,5	16.08±5 8,2	15.08±1 0,2	7.09±5 6,0	12.10±2 2,4	13±1 16,9	164±3 5,7
<i>C. calpodendron</i>	5.05±3 16,8	3.05±2 14,8	16.05±3 10,2	14.06±2 8,7	22.05±2 8,7	1.06±2 4,6	13.09±4 13,5	13.09±5 12,3	25.09±3 5,6	13.10±3 4,8	11±1 14,3	160±3 7,9
<i>C. chlorocarpa</i>	3.05±3 11,1	6.05±3 8,7	19.05±2 6,8	16.06±5 13,0	26.05±4 7,4	4.06±3 8,3	27.08±3 4,2	2.09±4 3,4	19.09±1 4,1	8.10±3 5,6	10±2 14,3	158±6 9,8
<i>C. chlorosarca</i>	28.04±2 16,4	5.05±1 3,6	11.05±1 10,6	10.07±6 17,5	25.05±2 7,0	6.06±3 7,8	3.09±5 5,1	3.09±4 9,3	21.09±2 4,0	6.10±2 2,9	13±2 12,4	161±4 3,8
<i>C. dahurica</i>	25.04±2 14,1	6.05±1 15,5	15.05±1 8,0	13.06±2 7,6	25.05±3 12,5	5.06±3 10,9	16.08±1 2,6	25.08±3 8,5	14.09±2 3,9	28.09±2 5,0	12±3 16,4	147±4 10,9
<i>C. douglasii</i>	6.05±2 11,2	2.05±3 13,3	15.05±3 9,1	10.06±3 12,0	22.05±2 8,3	1.06±1 4,8	21.09±4 5,6	30.09±2 7,9	17.09±4 3,8	18.10±5 9,4	11±2 14,2	165±4 9,4
<i>C. faxonii</i>	25.04±4 22,1	3.05±3 8,7	15.05±4 9,2	7.06±2 7,8	26.05±4 11,3	6.06±3 16,5	26.08±3 8,7	9.09±7 7,0	23.09±5 3,4	9.10±2 1,4	12±3 12,5	169±4 8,3
<i>C. flabellata</i>	2.05±3 11,3	4.05±4 15,6	18.05±2 11,1	12.06±2 14,1	23.05±2 6,8	30.05±1 4,5	9.10±6 21,3	30.09±2 11,6	3.10±3 12,5	15.10±2 10,4	8±1 9,8	157±8 10,0
<i>C. maximowiczii</i>	27.04±3 13,7	3.05±3 8,7	15.05±3 12,9	26.06±3 8,8	30.05±3 12,6	7.06±4 18,0	22.08±5 7,9	17.08±3 14,8	1.09±4 14,1	10.10±5 6,6	9±1 18,6	155±1 2,8
<i>C. mollis</i>	25.04±3 21,2	11.05±2 10,5	23.05±2 6,5	22.06±5 7,8	30.05±1 3,1	10.06±2 6,2	13.08±4 6,3	24.09±3 6,8	28.09±4 6,2	15.10±6 11,4	11±2 23,8	173±11 18,1

Окончание табл. 2

Вид	Развитие почек		Развер- тывание настояще- го листа	Оконча- ние роста побегов	Цветение		Созре- вание плодов	Появление осенней окраски листьев	Листопад		Продолжительность, дни	
	вегета- тивных	генера- тивных			начало	конец			начало	конец	цветения	вегетации
<i>C. monguana</i>	$\underline{27.04} \pm 4$ 21,9	$\underline{6.05} \pm 3$ 6,3	$\underline{15.05} \pm 6$ 12,0	$\underline{13.06} \pm 3$ 11,6	$\underline{26.05} \pm 2$ 8,3	$\underline{1.06} \pm 3$ 5,4	$\underline{2.09} \pm 7$ 9,8	$\underline{2.09} \pm 2$ 9,1	$\underline{29.09} \pm 6$ 5,6	$\underline{15.10} \pm 5$ 3,0	$\underline{7} \pm 4$ 10,2	$\underline{171} \pm 4$ 3,3
<i>C. nigra</i>	$\underline{3.05} \pm 2$ 10,9	$\underline{6.05} \pm 5$ 10,7	$\underline{13.05} \pm 1$ 6,2	$\underline{3.07} \pm 4$ 9,1	$\underline{26.05} \pm 7$ 12,1	$\underline{5.06} \pm 3$ 10,8	$\underline{28.08} \pm 6$ 5,0	$\underline{11.09} \pm 6$ 8,5	$\underline{24.09} \pm 6$ 6,0	$\underline{23.10} \pm 7$ 6,6	$\underline{11} \pm 1$ 1,2	$\underline{173} \pm 5$ 7,4
<i>C. pinnatifida</i>	$\underline{16.04} \pm 1$ 10,0	$\underline{5.05} \pm 2$ 12,1	$\underline{18.05} \pm 1$ 9,7	$\underline{14.06} \pm 2$ 5,1	$\underline{29.05} \pm 1$ 4,4	$\underline{6.06} \pm 1$ 5,2	$\underline{7.09} \pm 2$ 4,0	$\underline{22.08} \pm 1$ 3,4	$\underline{14.09} \pm 1$ 3,8	$\underline{29.09} \pm 1$ 2,7	$\underline{9} \pm 1$ 28,4	$\underline{167} \pm 2$ 6,4
<i>C. punctata</i>	$\underline{1.05} \pm 1$ 12,1	$\underline{7.05} \pm 3$ 14,7	$\underline{12.05} \pm 1$ 7,6	$\underline{3.07} \pm 6$ 16,5	$\underline{26.05} \pm 1$ 8,1	$\underline{5.06} \pm 2$ 7,7	$\underline{28.08} \pm 2$ 4,9	$\underline{31.08} \pm 3$ 7,9	$\underline{9.09} \pm 3$ 5,8	$\underline{17.10} \pm 2$ 3,6	$\underline{10} \pm 1$ 20,6	$\underline{165} \pm 2$ 5,4
<i>C. remotilobata</i>	$\underline{4.05} \pm 1$ 8,6	$\underline{10.05} \pm 3$ 12,3	$\underline{16.05} \pm 2$ 8,4	$\underline{22.07} \pm 7$ 16,8	$\underline{2.06} \pm 1$ 0,5	$\underline{13.06} \pm 6$ 14,5	$\underline{31.08} \pm 3$ 2,9	$\underline{20.09} \pm 3$ 8,1	$\underline{17.10} \pm 4$ 9,6	$\underline{19.10} \pm 1$ 2,9	$\underline{11} \pm 2$ 21,9	$\underline{166} \pm 3$ 6,5
<i>C. rivularis</i>	$\underline{4.05} \pm 2$ 9,5	$\underline{8.05} \pm 3$ 11,8	$\underline{16.05} \pm 1$ 4,8	$\underline{25.06} \pm 4$ 10,7	$\underline{29.05} \pm 2$ 5,4	$\underline{8.06} \pm 2$ 6,9	$\underline{27.08} \pm 4$ 5,8	$\underline{1.09} \pm 3$ 5,3	$\underline{21.09} \pm 7$ 8,0	$\underline{16.10} \pm 1$ 1,1	$\underline{10} \pm 2$ 36,0	$\underline{169} \pm 2$ 3,5
<i>C. rusanovii</i>	$\underline{28.04} \pm 2$ 13,2	$\underline{1.05} \pm 3$ 15,5	$\underline{12.05} \pm 1$ 6,5	$\underline{19.06} \pm 3$ 5,6	$\underline{22.05} \pm 4$ 13,6	$\underline{7.06} \pm 2$ 7,3	$\underline{30.08} \pm 3$ 5,6	$\underline{29.08} \pm 3$ 5,8	$\underline{13.09} \pm 4$ 5,8	$\underline{7.10} \pm 2$ 2,3	$\underline{17} \pm 2$ 18,0	$\underline{162} \pm 3$ 6,3
<i>C. songarica</i>	$\underline{3.05} \pm 2$ 11,8	$\underline{6.05} \pm 2$ 11,5	$\underline{15.05} \pm 1$ 8,0	$\underline{20.07} \pm 6$ 18,0	$\underline{6.06} \pm 3$ 10,4	$\underline{16.06} \pm 3$ 8,9	$\underline{3.10} \pm 1$ 1,5	$\underline{21.09} \pm 3$ 5,5	$\underline{27.09} \pm 6$ 7,9	$\underline{17.10} \pm 2$ 1,5	$\underline{11} \pm 1$ 30,5	$\underline{169} \pm 9$ 12,0
<i>C. tianshanica</i>	$\underline{2.05} \pm 3$ 14,1	$\underline{4.05} \pm 2$ 13,3	$\underline{16.05} \pm 2$ 7,4	$\underline{13.06} \pm 3$ 11,2	$\underline{27.05} \pm 2$ 3,5	$\underline{4.06} \pm 3$ 12,1	$\underline{28.08} \pm 4$ 5,2	$\underline{29.09} \pm 3$ 13,1	$\underline{2.10} \pm 2$ 3,8	$\underline{24.10} \pm 2$ 3,2	$\underline{9} \pm 1$ 17,2	$\underline{175} \pm 3$ 8,7

Примечание: В числителе приведена средняя дата наступления фенологической фазы ± пределы наступления данной фазы (дни); в знаменателе – коэффициент вариации.

Выявлена высокая корреляционная зависимость между суммой эффективных температур и началом цветения боярышников ($r = 0,99$). От начала развития генеративных почек до цветения иногда проходит от 6 до 10 дней (у 52,3 % видов), у *C. chlorocarpa* и *C. chlorosarca* данный период занимает 20 дней, у *C. pinnatifida* – 25 дней, остальные виды находятся в пределах этих значений, наибольшая продолжительность указанного периода отмечена у *C. songarica* – 31 день.

Пик цветения коллекции боярышника приходится на 3-ю декаду мая – 1-ю декаду июня. Период цветения у рассматриваемых видов в среднем составлял 10 ± 1 дней ($C_v - 25,9\%$) – от 5 до 16 в зависимости от вида (табл. 2). Последовательность зацветания рассматриваемых видов можно наглядно представить по календарю цветения (табл. 3). Данный период в коллекции боярышника растянут и имеет протяженность в 30 дней. Поздними сроками зацветания характеризуются 2 вида, начинающие цвести в 1-й декаде июня – это *C. remotilobata* и *C. songarica*. Североамериканские виды цветут в течение 23 дней. Дальневосточные боярышники вступают в эту фазу в 3-й декаде мая с продолжительностью в 14 дней. Представители среднеазиатского и восточноазиатского регионов зацветают в разные сроки. Они цветут в течение 24 дней, начиная со 2 декады мая и заканчивая 2-й декадой июня. Виды европейского происхождения зацветают в одинаковые сроки в 3-й декаде мая с общей продолжительностью фазы в 11 дней. Обнаружена слабая отрицательная корреляционная связь между началом цветения боярышников и его продолжительностью ($r = -0,32$).

Созревание плодов у изучаемых видов происходит в несколько сроков. Плодоношение 61,9 % видов наблюдалось во 2–3-й декадах августа, у 28,6 % – в 1–3-й декадах сентября, созревание плодов у *C. flabellata* и *C. songarica* (9,5 %) отмечалось в 1–2-й декадах октября (табл. 2). При этом данный период имел различную продолжительность. Так, промежуток времени от созревания плодов до их опадения составлял от 7 до 38 дней. Очень быстро падают плоды после созревания *C. pinnatifida* – через 7–8 дней, у 6 видов этот период составляет 36–38 дней (*C. arnoldiana*, *C. faxonii*, *C. bretschnideri* и др.), для некоторых характерна перезимовка плодов, они частично остаются на материнском растении до весны (*C. chlorosarca*, *C. punctata*, *C. rivularis*, *C. rusanovii*, *C. tianshanica*). В среднем период созревания плодов у боярышников составил 88 ± 3 дней ($C_v - 13,7\%$). Листопад происходил в разные сроки, с 1-й декады сентября и до заморозков (до -10 – -12 °C в 1–3-й декадах октября). Не успевшие облететь к этому времени листья становились бурыми от ночных заморозков. У *C. remotilobata*, *C. × almaatensis*, *C. bretschnideri*, *C. nigra*, *C. flabellata* и *C. dahurica* период листопада очень длительный и составляет от 35 до 43 дней, а у *C. arnoldiana*, *C. pinnatifida*, *C. monogyna* и др. листопад происходит в течение 12–20 дней. В среднем данный период занимает 26 ± 2 дня ($C_v - 38,6\%$).

Сравнивали наступление фаз роста и развития видов боярышника, приведенных в монографии Н.И. Лиховид [7], и их современный ритм, выявлены некоторые отличия. У большинства видов фазы развития в настоящее время остались в пределах, отмеченных в монографии. Однако есть боярышники, у которых, например, фаза начала развития вегетативных почек начинается раньше на 4–12 дней: *C. faxonii* – на 4 дня, *C. pinnatifida* – на 6 дней, *C. × almaatensis* – на 12 дней. Фазы цветения и плодоношения у *Crataegus × almaatensis* в современных условиях наступают на 6 дней раньше.

У *C. songarica* созревание семян в настоящее время стало протяженнее и достигает 30 дней. Период листопада у большинства изучаемых боярышников более длителен по сравнению с 80-ми гг. прошлого века (у *C. nigra* листопад заканчивается на 17 дней позже, у *C. maximowiczii* листопад начинается раньше на 24 дня, а заканчивается на 4 дня позже, у *C. pinnatifida* – позже на 7 дней). У *C. ×almaatensis*, *C. songarica* и *C. faxonii* данная фаза проходит в те же сроки, что и ранее.

Вегетационный период у аборигенных растений в степной зоне Хакасии занимает 160–165 дней [7]. У рассматриваемых видов его протяженность изменяется от 147 до 186 дней. Коротковегетирующими видами является 19,0 % коллекции (*C. dahurica*, *C. maximowiczii*, *C. flabellata*, *C. chlorocarpa*). Продолжительность данного периода, близкая к продолжительности у местных видов, характерна для 57,2 % боярышников (*C. ×almaatensis*, *C. brettschneideri*, *C. calpodendron*, *C. chlorosarca*, *C. maximowiczii* и др.). Период от 172 дней и выше наблюдался у 23,8 % видов (*C. ×almaatensis*, *C. faxonii*, *C. douglasii* и др.) – это длительно вегетирующие виды. Наибольший вегетационный период наблюдался у *C. arnoldiana* и *C. songarica* – 186 и 190 дней соответственно.

Рассматриваемые боярышники по шкале перспективности являются вполне перспективными. В условиях дендрария они зимостойки, проходят все фазы роста и развития. Несмотря на наличие длительно вегетирующих растений, обмерзаний не наблюдалось.

Заключение

Установлено, что в дендрарии института произрастает 21 вид боярышника, средний возраст растений составляет 40 лет. В условиях степной зоны Хакасии большинство интродуцированных боярышников – это деревья разной величины, которые формируют семена, 28,5 % видов являются вегетивно-подвижными.

Выделено 57,2 % видов, полностью укладывающихся в длину вегетационного периода аборигенных растений, 23,8 % являются длительно вегетирующими. Пик цветения боярышников дендрария приходится на промежуток времени с 26 мая по 4 июня, с продолжительностью в 10 дней. Большинство видов показали высокий адаптационный потенциал в изменяющихся условиях среды. За изучаемый период они не поменяли ритм роста по сравнению с 1980-ми гг., за исключением *Crataegus faxonii*, *C. pinnatifida*, *C. ×almaatensis* в наступлении весенних фаз развития. Прослежена общая тенденция увеличения длительности листопада у большинства боярышников, кроме *C. ×almaatensis*, *C. songarica* и *C. faxonii*.

Виды, которые не образуют корневых отпрысков, рекомендуются для озеленения населенных пунктов посредством создания непроходимых живых изгородей, групповых посадок (*C. dahurica*, *C. faxonii*, *C. rivularis*). Для нестриженных изгородей подходят невысокие боярышники – *C. arnoldiana* и *C. mollis*. Виды с широкими структурными кронами (*C. maximowiczii*, *C. songarica*, *C. rusanovii*, *C. tianshanica*) – в качестве солитеров. Для устойчивости рассматриваемых боярышников в случае использования при озеленении необходим тщательный подбор мест посадки и орошение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова Ю.В. Боярышники – перспективные интродуценты для озеленения северных городов // Наука – лесному хоз-ву Севера: сб. науч. тр. ФБУ «СевНИИЛХ». Архангельск: СевНИИЛХ, 2019. С. 194–198.
Aleksandrova Yu.V. Hawthorns – Promising Introduced Species for Landscaping Northern Cities. *Nauka – lesnomu khozyajstvu Severa: Collection of Scientific Papers of the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry”*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry Publ., 2019, pp. 194–198. (In Russ.).
2. Введение в культуру интродуцированных перспективных видов растений для южных районов Средней Сибири: метод. реком. / РАСХН, Сиб. отд-ние, ГНУ НИИАП Хакасии. Абакан: Март, 2003. 23 с.
Introduction into the Culture of Introduced Promising Plant Species for the Southern Regions of Central Siberia: Guidelines. Abakan, Russian Academy of Agricultural Sciences (Siberian Branch), State Science Institution “Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia”, 2003. 23 p. (In Russ.).
3. Винокуров А.А. Боярышники Алтайского ботанического сада // Современные экологические проблемы Центрально-Черноземного региона: материалы. заочн. Междунар. науч.-практ. конф. Вып. 2. Особо охраняемые природные территории. Интродукция растений. Воронеж: Роза ветров, 2016. С. 33–46.
Vinokurov A.A. Hawthorns of the Altai Botanical Garden. *Modern Environmental Problems of the Central Black Earth Region: Materials of the Correspondence International Scientific and Practical Conference. Iss. 2. Specially Protected Natural Territories. Introduction of Plants*. Voronezh, Roza vetrov Publ., 2016, pp. 33–46. (In Russ.).
4. Донская О.Л., Николаева З.Н. Экологическая оценка агроэкосистем юга Средней Сибири. Абакан: Хакасск. гос. ун-т им. Н.Ф. Катанова, 2008. 176 с.
Donskaya O.L., Nikolaeva Z.N. *Ecological Assessment of Agroecosystems of the South of Central Siberia*. Abakan, Khakassian State University named after N. F. Katanov Publ., 2008. 176 p. (In Russ.).
5. Зайцев Г.Н. Фенология древесных растений. М.: Наука, 1981. 120 с.
Zajtsev G.N. *Phenology of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 120 p. (In Russ.).
6. Кентбаева Б.А. Методика визуальной оценки перспективности древесных растений на примере представителей рода *Crataegus* L. // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2010. № 13. С. 64–68.
Kentbaeva B.A. Methodology for Visual Assessment of the Potential of Woody Plants by the Example of Representatives of the genus *Crataegus* L. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rastenij*, 2010, no. 13, pp. 64–68. (In Russ.).
7. Лиховид Н.И. Интродукция деревьев и кустарников в Хакасии. Новосибирск, 1994. Ч. 1. 348 с.
Likhovid N.I. *Introduction of Trees and Shrubs in Khakassia*. Novosibirsk, 1994, part 1. 348 p. (In Russ.).
8. Лиховид Н.И. Интродукция древесных растений в аридных условиях юга Средней Сибири. Абакан: Март, 2007. С. 8–13.
Likhovid N.I. *Introduction of Woody Plants in Arid Conditions of the South of Central Siberia*. Abakan, Mart Publ., 2007, pp. 8–13. (In Russ.).
9. Лучник З.И. Методика изучения интродуцированных деревьев и кустарников // Вопросы декоративного садоводства. Барнаул, 1964. С. 6–22.
Luchnik Z.I. Methodology for Studying Introduced Trees and Shrubs. *Voprosy dekorativnogo sadovodstva*. Barnaul, 1964, pp. 6–22. (In Russ.).
10. Мамаев С.А. Закономерности внутривидовой изменчивости лиственных древесных пород. Свердловск, 1975. 140 с.

Мамаев S.A. *Patterns of Intraspecific Variability of Deciduous Tree Species*. Sverdlovsk, 1975. 140 p. (In Russ.).

11. Петрик В.В., Александрова Ю.В., Васильева Н.Н. Фенологическое развитие некоторых видов боярышников в дендрологическом саду САФУ // Ландшафтная архитектура в ботанических садах и дендропарках: сб. мат. VIII Междунар. конф. Южно-Сахалинск: Транспорт. С. 120–124.

Petrik V.V., Aleksandrova Yu.V., Vasil'eva N.N. Phenological Development of Some Species of Hawthorns in the Dendrological Garden of the Northern (Arctic) Federal University. *Landscape Architecture in Botanical Gardens and Arboretums: Proceedings of the VIII International Conference*. Yuzhno-Sakhalinsk, Transport Publ., pp. 120–124. (In Russ.).

12. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Краснообск: ГУП РПО СО РАСХН, 2004. 162 с.

Sorokin O.D. *Applied Statistics on a Computer*. Krasnoobsk, Russian Academy of Agricultural Sciences, 2004. 162 p. (In Russ.).

13. Уфимов Р.А. Род Боярышник (*Crataegus* L., Rosaceae) во флоре Восточной Европы и Кавказа: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 2013. 22 с.

Ufimov R.A. *The Genus Hawthorn (Crataegus L., Rosaceae) in the Flora of Eastern Europe and the Caucasus*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. St. Petersburg, 2013. 22 p. (In Russ.).

14. Федорова Д.Г. Формирование коллекции представителей рода *Crataegus* L. в ботаническом саду Оренбургского государственного университета // Colloquium-Journal. 2017. № 10. С. 5–8.

Fedorova D.G. Formation of a Collection of Representatives of the Genus *Crataegus* L. in the Botanical Garden of the Orenburg State University. *Colloquium-Journal*, 2017, no. 10, pp. 5–8. (In Russ.).

15. Фирсова М.В. Интегральная оценка перспективности использования в культуре некоторых видов рода *Crataegus* L. в условиях лесостепного Приобья // Вестн. ИрГСХА. 2011. Т. 8, вып. 44. С. 138–144.

Firsova M.V. Integral Assessment of the Prospects of Use of Some *Crataegus* L. Species in the Forest-Steppe Circumob Area. *Vestnik IrGSHA*, 2011, vol. 8, iss. 44, pp. 138–144. (In Russ.).

16. Школа ландшафтного дизайна. Режим доступа: www.landscape-school.ru (дата обращения: 20.10.22).

The School of Landscape Design. (In Russ.).

17. Dai H., Zhang Z., Guo X. Adventitious Bud Regeneration from Leaf and Cotyledon Explants of Chinese Hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bge. var. *major* N.E.Br.). *In Vitro Cellular Developmental Biology – Plant*, 2007, vol. 43, pp. 2–8.

<https://doi.org/10.1007/s11627-006-9008-3>

18. Dong W., Li Z.X. *The Science and Practice of Chinese Fruit Tree: Hawthorn*. Shanxi, Science Press, 2015, pp. 23–52.

19. Emami A., Shabanian N., Rahmani M.-S., Khadivi A., Mohammad-Panah N. Genetic Characterization of the *Crataegus* Genus: Implications for *in situ* Conservation. *Scientia Horticulturae*, 2018, vol. 231, pp. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.014>

20. Khiari S., Boussaid M., and Messaoud C. Genetic Diversity and Population Structure in Natural Populations of Tunisian Azarole (*Crataegus azarolus* L. var. *aronia* L.) Assessed by Microsatellite Markers. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, vol. 59, pp. 264–270. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2015.01.025>

21. Lo E.Y.Y., Stefanović S., Christensen K.I., Dickinson T.A. Evidence for Genetic Association between East Asian and Western North American *Crataegus* L. (Rosaceae) and Rapid Divergence of the Eastern North American Lineages Based on Multiple DNA Sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2009, vol. 51, iss. 2, pp. 157–168.

<https://doi.org/10.1016/j.ympev.2009.01.018>

22. Mallet J. *Hybrid Speciation*. Nature, 2007, vol. 446, pp. 279–283. <https://doi.org/10.1038/nature05706>
23. Nas M.N., Gokbunar L., Sevgin N., Aydemir M., Dagli M., Susluoglu Z. Micropropagation of Mature *Crataegus aronia* L., a Medicinal and Ornamental Plant with Rootstock Potential for Pome Fruit. *Plant Growth Regulation*, 2012, vol. 67, pp. 57–63. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9662-x>
24. Özyurt G., Yücesan Z., Ak N., Oktan E., Üçler A.Ö. Ecological and Economic Importance of Studying Propagation Techniques of Common Hawthorn *Crataegus monogyna* Jacq. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2019, no 4, pp. 63–67.
25. Phipps J.B., O’Kennon R.J., Lance R.W. *Hawthorns and Medlars*. Portland, 2003. 139 p.
26. Phipps J.B., O’Kennon R.J., Dvorsky K.A. Review of *Crataegus* series *Pulcherri-mae* (Rosaceae). *Sida*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 973–1007.
27. Strelets V.D., Balabanov V.I., Vinogradova O.A. Prospects of Hawthorn Introduction into Industrial Fruit Culture. *Nauchnyj al'manakh stran Prichernomor'ya* = Science Almanac of Black Sea Region Countries, 2015, no. 2, pp. 13–18.
28. Du X., Zhang X., Bu H., Zhang T., Lao Y., Dong W. Molecular Analysis of Evolution and Origins of Cultivated Hawthorn (*Crataegus* spp.) and Related Species in China. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10, art. no. 443. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00443>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*232.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-64-76

Эффективность создания культур сосны обыкновенной в сухой степи

А.Е. Осипенко, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAG-1421-2021](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

С.В. Залесов[✉], д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [H-2605-2019](#),

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

К.А. Башегуров, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [LFT-4398-2024](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9050-8902>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; osipenkoae@m.usfeu.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru[✉], bashegurovka@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 14.10.24 / Одобрена после рецензирования 10.12.24 / Принята к печати 11.12.24

Аннотация. В условиях аридизации климата и высокой антропогенной нагрузки на лесные насаждения необходимо совершенствовать систему лесовосстановления с учетом производственного опыта. Цель исследования – оценка роста и сохранности культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданных с 2014 по 2018 гг. посадочным материалом с открытой и закрытой корневой системой на крупноплощадной гари 2010 г. Исследование проведено в Ключевском лесничестве Алтайского края. Заложено 9 пробных площадей прямоугольной формы, размером не менее 0,25 га. Достоверность различий средней сохранности лесных культур, сформированных из 2 видов посадочного материала, была определена при помощи U-критерия Манна–Уитни. Для оценки вариабельности сохранности лесных культур применялся критерий Фишера (F-тест). Приведены местоположение и таксационная характеристика 5–9-летних лесных культур; текущие приросты по высоте деревьев сосны; графики хода роста по высоте самосева и культур сосны. Установлено, что средняя сохранность на 3 из 4 участков лесных культур, полученных из семян с открытой корневой системой, больше, чем у лесных культур, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой. Это обусловлено лучшими погодными условиями в первые 4–5 лет роста лесных культур из семян с открытой корневой системой. Деревья, выросшие из семян с открытой корневой системой, в первые 5–7 лет после посадки уступают по средней высоте деревьям естественного происхождения, однако к возрасту 9 лет догоняют их по данному показателю. На основании проведенного исследования рекомендовано в условиях сухой степи увеличить густоту посадки семян с закрытой корневой системой до 4–6 тыс. шт./га. Продолжить данное исследование можно в следующих направлениях: изучение большего количества участков лесных культур, высаженных в различные годы при неодинаковых погодных условиях; наблюдение за морфологическими различиями у деревьев, сформировавшихся из семян с открытой и закрытой корневой системами. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании лесных культур и разработке региональных рекомендаций по лесовосстановлению в Алтае-Новосибирском районе лесостепей и ленточных боров.



Ключевые слова: лесные культуры, сосна обыкновенная, сеянцы, открытая корневая система, закрытая корневая система, степь

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ по мероприятию «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» 2024–2026 гг. (соглашение № 24-76-00009).

Для цитирования: Осипенко А.Е., Залесов С.В., Башегуров К.А. Эффективность создания культур сосны обыкновенной в сухой степи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 64–76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-64-76>

Original article

The Efficiency of Creating Scots Pine Crops in Dry Steppe

Aleksey E. Osipenko, Candidate of Agriculture, Assoc.Prof;

ResearcherID: [AAG-1421-2021](https://orcid.org/0000-0002-6148-1747), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

Sergey V. Zalesov[✉], *Doctor of Agriculture, Prof.;* ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

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

Konstantin A. Bashegurov, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [LFT-4398-2024](https://orcid.org/0000-0002-9050-8902),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9050-8902>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirsky Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; osipenkoae@m.usfeu.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru[✉], bashegurovka@m.usfeu.ru

Received on December 14, 2023 / Approved after reviewing on March 6, 2024 / Accepted on March 10, 2024

Abstract. In the context of climate aridisation and high anthropogenic load on forest plantations, it is necessary to improve the reforestation system taking into account the production experience. The aim of the study has been to evaluate the growth and survival of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) crops created from 2014 to 2018 using planting material with open and closed root systems on a large-scale burnt area from 2010. The research has been conducted in the Klyuchevsky Forestry of the Altai Territory. 9 rectangular sample plots of at least 0.25 ha in size have been established. The reliability of differences in the average survival rate of forest crops formed from 2 types of planting material has been determined using the Mann-Whitney U-test. To assess the variability of forest crop survival, the Fisher criterion (F-test) has been used. The location and inventory characteristics of 5–9-year-old forest crops, current height increment values of pine trees, as well as graphs of the growth rate in height of self-seeding and pine crops have been given. It has been established that the average survival rate in 3 out of 4 forest crop plots obtained from seedlings with an open root system is higher than that of forest crops created from planting material with a closed root system. This is due to better weather conditions in the first 4–5 years of growth of forest crops from seedlings with an open root system. Trees grown from seedlings with an open root system are inferior in average height to trees of natural origin in the first 5–7 years after planting, but by the age of 9 years they are catching up with the latter in this indicator. Based on the conducted research, it is recommended to increase the planting density of seedlings with a closed root system to 4–6 thousand pcs/ha in dry steppe conditions. This research can be continued in the following directions: studying a larger number of forest crop plots planted in different years under different weather conditions, as well as observing morphological differences in trees formed from seedlings with open and closed root systems. The results obtained can be

useful in designing forest crops and developing regional recommendations for reforestation in the Altai-Novosibirsk area of forest-steppes and ribbon forests.

Keywords: forest crops, Scots pine, seedlings, open root system, closed root system, steppe

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation for the “Conducting Initiative Research by Young Scientists” event in 2024–2026 (agreement no. 24-76-00009).

For citation: Osipenko A.E., Zalesov S.V., Bashegurov K.A. The Efficiency of Creating Scots Pine Crops in Dry Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 64–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-64-76>

Введение

Восьмого сентября 2010 г. верховой лесной пожар перешел из Казахстана в Алтайский край и уничтожил лесные насаждения на площади около 17 тыс. га. Восстановление леса на такой большой территории естественным путем не представляется возможным, т. к. в условиях сухой степи этот процесс может затянуться на многие десятилетия [17, 18, 20].

Работы по искусственному лесовосстановлению на гари шли на протяжении 12 лет. Всего за период с 2011 по 2022 гг. в Ключевском лесничестве было создано 13 522,1 га лесных культур. Посадка лесных культур осуществлялась в основном механизировано сеянцами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с открытой корневой системой (ОКС) – 11 547,3 га (85,4 % площади). Однако высаживались и сеянцы с закрытой корневой системой (ЗКС). Первые лесные культуры, сформированные посадочным материалом с ЗКС, в Ключевском лесничестве появились в 2017 г. на площади 1012,4 га. Посадочный материал с ОКС в этот год в лесничестве не использовался. Также посадка сеянцев с ЗКС осуществлялась в 2018 г – 902,4 га и 2021 г – 60 га. Меньшие объемы применения сеянцев с ЗКС были обусловлены высокой ценой таких сеянцев и отсутствием у лесопользователей средств механизации для посадки.

Многие ученые на сегодняшний день изучают лесные культуры, созданные посадочным материалом с ЗКС, как в условиях лесостепи и степи [7, 13, 22], так и в условиях других природных зон [3, 5, 19]. Однако для района исследования опытных данных все еще мало. В том числе наблюдается недостаток информации о росте и развитии лесных культур, достигших возраста отнесения к лесопокрытым землям. В рамках описываемой в статье работы мы предприняли попытку осветить этот вопрос.

Для достоверности эксперимента по выявлению различий в сохранности лесных культур, созданных посадочным материалом с ОКС и ЗКС, необходимо проанализировать состояние культур, полученных посадочным материалом одинакового качества, в один сезон года, при равных погодных и лесорастительных условиях, по схожей технологии, одними и теми же рабочими. Собрать такого рода данные в производственных условиях довольно сложно, т. к. от посадки к посадке указанные факторы зачастую изменяются. В рамках нашего исследования мы старались подобрать участки лесных культур, соответствующие указанным требованиям.

Цель исследования – оценка роста и сохранности культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданных посадочным материалом с открытой и закрытой корневой системой на крупноплощадной гари в условиях сухой степи.

Объекты и методы исследования

Полевой этап исследования осуществлялся в мае 2023 г. на землях Бастанского и Николаевского участков лесничеств Ключевского лесничества Алтайского края (Михайловский административный район). В соответствии с приказом Минприроды России от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления...», территория относится к Алтае-Новосибирскому району лесостепей и ленточных боров. Согласно схеме климатического районирования А.П. Сляднева и Я.И. Фельдмана, – к провинции сухой степи [15].

В связи с тем, что замеры производились весной, когда прирост в высоту и по диаметру текущего (на момент исследования) года еще не сформировался, таксационные показатели характеризуют состояние растений на конец вегетационного периода 2022 г.

Объектом исследования выступают лесные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданные на крупноплощадной гари 2010 г. До пожара на месте рассматриваемых участков произрастали чистые сосняки III–IV классов бонитета. Все изучаемые культуры были созданы на боровых песках. Мезорельеф характеризуется как волнистый, с пологими холмами и понижениями. Тип леса – сухой бор пологих всхолмлений (СБП), тип лесорастительных условий – А₁.

В качестве посадочного материала использовались семена с ОКС и ЗКС. Посадочный материал с ОКС был выращен в лесном питомнике в с. Покровка (Ключевский район). Сеянцы с ЗКС получены в Алтайском лесном селекционно-семеноводческом центре в кассетах Plantek-F, BCC SideSlit (81 ячейка). В обоих случаях для выращивания посадочного материала брали нормальные по селекционной категории семена, собранные в пределах Алтайского края (12-й лесосеменной район). Возраст посадочного материала с ЗКС – 1 год (кроме участка 5 – 2 года), сеянцев с ОКС – 2 года. На момент посадки сеянцы были здоровыми. Технологии выращивания сеянцев с ОКС и ЗКС описаны в монографии [4].

Лесные культуры создавались в апреле–мае 2014–2018 гг. рядовым способом. Ряды направлены с юго-запада на северо-восток параллельно квартальным просекам. Почва обрабатывалась плугом ПКЛ-70, агрегатированным с трактором МТЗ-82. Посадка осуществлялась в дно борозды. Сеянцы с ЗКС были посажены лесопосадочной трубой Pottiputki, а сеянцы с ОКС – лесопосадочной машиной МЛУ-1. Проектная густота посадки сеянцев с ЗКС составляла 2,5 тыс. шт./га (3,0 × 1,33 м), с ОКС – 4,0 тыс. шт./га (3,0 × 0,83 м).

Согласно книге лесных культур, на участках 8 и 9 в первый год после посадки был проведен агротехнический уход культиватором КЛБ-1,7. Дополнение лесных культур осуществлено на участках 5 (весной 2018 г., 1,5 тыс. шт./га) и 7 (осенью 2017 г., 1,4 тыс. шт./га). На других участках дополнения не было. Фактическая информация об исследуемых лесных культурах приведена в табл. 1. На рис. 1 показан один из участков.

Для изучения участков лесных культур использовался метод пробных площадей (ПП). ПП имели прямоугольную форму, их размер был не менее 0,25 га. Границы ПП вдоль рядов лесных культур проходили по центру междурядий. По углам ПП устанавливались деревянные вешки. На ПП учитывались все живые деревья сосны искусственного и естественного происхожде-

ния. Замерялись диаметры деревьев, достигших высоты 1,3 м. У не менее чем 30 деревьев на каждой ПП фиксировались высота, текущие приросты в высоту (по мутовкам) и диаметр у основания ствола. Высота и текущие приросты в высоту определялись измерительной рулеткой с точностью $\pm 0,4$ мм на 1 м длины, а диаметры у основания ствола и на высоте 1,3 м – электронным штангенциркулем Electronic Digital Caliper с точностью $\pm 0,2$ мм. Объем выборки растений был обусловлен оптимальным соотношением трудозатрат и точностью опыта, которая не превышала 7 %.

Таблица 1

Местонахождение и описание исследуемых участков лесных культур
The location and description of the studied forest crop plots

№ участка	Координаты GPS, с. ш. в. д.	Участковое лесничество	Квартал	Выдел	Год посадки	Средний шаг посадки, м	Междурядья, м	Густота посадки, тыс. шт./га
<i>ОКС</i>								
1	51°48,476' 079°28,039'	Бастанское	68	3	2018	1,0	2,8	3,6
2	51°50,090' 079°29,213'		28	22	2014	0,7	3,4	4,2
3	51°49,847' 079°28,659'		41	7	2015	0,7	2,5	5,7
4	51°50,386' 079°27,791'		13	13	2014	0,7	3,8	3,8
<i>ЗКС</i>								
5	51°50,180' 079°25,262'	Бастанское	10	2	2017	1,3	2,6	3,0
6	51°51,643' 079°25,256'	Николаевское	107	11	2017	1,4	3,6	2,0
7	51°51,443' 079°25,534'		121	3	2017	1,5	3,3	2,0
8	51°52,007' 079°24,709'		95	16	2017	1,6	2,8	2,2
9	51°52,235' 079°24,759'		95	10	2017	1,4	2,9	2,5

Для оценки различий между 2 выборками по уровню сохранности культур был использован U-критерий Манна–Уитни. Для сравнения вариабельности сохранности лесных культур – критерий Фишера (F-тест). Расчеты осуществлялись в программе MS Excel 2013.

Под «сохранностью лесных культур» мы понимаем выраженное в процентах отношение числа посадочных мест с выжившими растениями к общему числу посадочных мест, учтенных на пробной площади в культурах старше 3-летнего возраста. Несмотря на то, что данное определение почти полностью дублирует определение термина «приживаемость лесных культур», приведенное в Правилах лесовосстановления и противоречит ГОСТ 17559–82 «Лесные культуры. Термины и определения», на сегодняшний день в научной литературе понятие «сохранность лесных культур» применяется именно в этом значении [1, 2, 6, 7, 9, 11, 14].



Рис. 1. Культуры сосны, созданные посадочным материалом с ЗКС (ПП 5)

Fig. 1. The pine crops created using planting material with a closed root system (SP 5)

Вероятно, было бы правильнее различать «сохранность лесных культур» и «сохранность культивируемых растений», как это делает Н.Н. Чернов с соавторами [16]. В их трактовке понятие сохранности лесных культур совпадает с содержащимся в ГОСТ 17559–82 – величина, определяемая отношением площади, покрытой жизнеспособными лесными культурами, к общей площади лесных культур, заложенных за конкретный период, выраженная в процентах, а термин «сохранность культивируемых растений», по мнению Н.Н. Чернова с соавторами, следует применять к культурам, отнесенным к землям, на которых расположены леса. Однако в рамках нашего исследования мы остановимся на определении, приведенном выше.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 дана таксационная характеристика исследуемых лесных культур. Средняя сохранность насаждений, созданных сеянцами с ЗКС, составила 44,4 %, с ОКС – 72,5 %. Расчетное значение U-критерия равняется 1, при критическом значении 2 и уровне значимости 0,05. Таким образом, сохранность сеянцев с ОКС достоверно выше, чем с ЗКС. Однако данный вывод следует считать предварительным, т. к. объемы выборок довольно малы и культуры были высажены не в один год, а значит, погодные условия могли повлиять на сохранность насаждений разных лет создания. Вероятно, при увеличении объема экспериментальных данных результат может измениться. Расчетное значение F составило 4,94, критическое одностороннее – 6,59, р-значение – 0,079. Исходя из полученных результатов нулевая гипотеза отвергнута не была, т.е. дисперсии 2 выборок можно считать равными. Несогласованность результатов 2 статистических методов оценки свидетельствует о необходимости повышения объема выборок. Поэтому считаем целесообразным продолжить изучение данного вопроса в районе исследования.

В Алтае-Новосибирском районе лесостепей и ленточных боров для отнесения лесных участков к лесопокрытым землям в условиях типа леса СБП густота молодняков должна быть не менее 2,5 тыс. шт./га., средняя высота деревьев основных лесных древесных пород – не менее 0,9 м, а возраст лесных культур (давность создания) – не менее 6 лет.

Таблица 2

**Таксационная характеристика исследуемых участков лесных культур
по данным III**
The inventory characteristics of the studied forest crop plots according to SP data

ПП	Состав древосто- я	Давность создания лесных культур, лет	Эле- мент леса	Коли- чество растений, шт.	Средние			Текущая густота, шт./га	Сохран- ность лесных культур, %	
					биологи- ческий возраст, лет	высота, м	диаметр			
							на высоте 1,3 м, см			у основа- ния ствола, см
<i>ОКС</i>										
1	10С+С	5	10С	436	7	0,58	–	1,6	1744	48,4
			+С	2	10	2,24	3,1	6,8	8	–
2	10С	9	10С	911	11	2,60	2,3	4,7	3555	84,6
3		8	10С	1195	10	2,20	1,9	4,5	4594	80,6
4		9	10С	813	11	2,90	2,9	4,8	2895	76,2
<i>ЗКС</i>										
5	10С+С	6	10С	359	8	0,82	–	2,9	1436	47,9
			+С	4	9	1,24	1,9	4,5	16	–
6			10С	225	7	0,78	–	2,2	882	44,1
			+С	6	10	2,00	2,5	6,2	24	–
7			10С	188	7	0,79	0,7	2,4	734	36,7
			+С	17	10	2,00	2,3	5,8	66	–
8	10С	10С	308	7	0,86	–	2,2	1208	54,9	
9		10С	240	7	0,74	1,5	2,5	960	38,4	

Густота исследуемых лесных культур, выращенных из посадочного материала с ОКС, составляет 1,7–4,6 тыс. шт./га., с ЗКС – 0,8–1,4 тыс. шт./га. Средняя высота деревьев сосны из семян с ОКС через 5–6 лет после посадки – 0,6–1,2 м (определено по данным табл. 3); из семян с ЗКС через 6 лет после проведения посадочных работ – 0,7–0,9 м. Таким образом, можно заключить, что из 9 обследованных участков культур требованиям к молоднякам, площади которых подлежат отнесению к лесопокрытым землям, соответствуют только участки 2–4, созданные посадочным материалом с ОКС в период до 2016 г.

Участок 1 еще не достиг возраста отнесения к лесопокрытым землям (6 лет), однако с учетом его текущей густоты и темпов роста деревьев на нем можно заключить, что к концу вегетационного периода 2023 г. он не будет соответствовать требованиям и не перейдет в категорию покрытых лесом земель.

Деревья естественного происхождения на участках лесных культур при среднем возрасте 9–10 лет имеют средние высоту 1,9 м, диаметр ствола на высоте 1,3 м – 2,5 см, у основания ствола – 5,8 см. Это сопоставимо с аналогичными показателями деревьев, выращенных из семян с ОКС, которые в 10–11-летнем возрасте характеризуются средними высотой 2,6 м, диаметрами на высоте 1,3 м – 2,4 см, у основания ствола – 4,7 см.

Количество деревьев естественного происхождения (самосева) на участках лесных культур спустя 12,5 лет после пожара не превышает 66 шт./га. Этого недостаточно для успешного лесовосстановления. Следовательно, можно заключить, что без создания лесных культур участки не смогли бы покрыться древостоем естественным путем за рассматриваемый период времени.

Вероятно, в случае оставления этих участков на самозаращение дальнейшее естественное возобновление шло бы преимущественно в конусе полуденной тени единичных деревьев [12] и по мере увеличения площади затеняемой поверхности земли вследствие роста деревьев древесная растительность постепенно занимала бы собой все оставшееся пространство. Описанный процесс продолжался бы несколько десятилетий и привел бы к формированию разновозрастных сосновых насаждений. По нашему мнению, такой ход естественного возобновления может объяснять преобладание разновозрастных сосновых древостоев в ленточных борах Алтайского края [8].

В табл. 3 приведены данные о текущих приростах по высоте деревьев сосны различного происхождения. Данные таблицы показывают, что в лесных культурах, созданных в 2017 и 2018 гг. кульминация текущего прироста наступила на 4–5-й год после посадки. В культурах, высаженных в 2014 и 2015 гг., приросты по высоте продолжают увеличиваться с каждым годом, а значит, кульминация этого показателя еще не достигнута. Наибольшие текущие приросты по высоте у деревьев естественного происхождения зафиксированы на 7-й год их роста. Возможно, возраст наступления кульминации текущего прироста по высоте связан с обеспеченностью деревьев сосны влагой. Так, культуры, созданные в относительно благоприятные по увлажнению годы, кульминируют позже, а высаженные в преддверии засушливых лет не успевают сформировать достаточно мощную корневую систему и, испытывая дефицит влаги во время засушливых лет, замедляют свой рост в высоту [10, 21, 23].

Таблица 3

Текущие приросты по высоте деревьев сосны на исследуемых участках лесных культур по данным ПП, см
The current height increments of pine trees in the studied forest crop plots according to SP data, cm

ПП	Биологический возраст, лет									
	1 и 2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Культуры, ОКС</i>										
1	6,9	8,1	11,1	16,4	7,6	7,9	–	–	–	–
2	12,0	8,7	11,9	22,2	20,5	35,5	32,4	33,9	34,7	45,5
3	11,8	4,8	13,3	22,7	32,3	26,9	31,2	32,1	39,1	–
4	12,1	5,8	12,2	20,5	24,3	43,7	39,3	41,6	40,2	50,1
<i>Среднее</i>	10,7	6,9	12,1	20,5	21,2	28,5	34,3	35,9	38,0	47,8
<i>Культуры, ЗКС</i>										
5	7,2	6,7	10,0	17,3	13,1	12,6	14,9	–	–	–
6	10,0	14,1	17,9	14,7	8,5	12,3	–	–	–	–
7	9,9	13,3	16,3	15,3	11,4	12,4	–	–	–	–
8	10,1	15,3	17,1	17,2	10,1	16,0	–	–	–	–
9	9,9	12,3	13,6	12,4	10,2	15,3	–	–	–	–
<i>Среднее</i>	9,4	12,3	15,0	15,4	10,7	13,7	14,9	–	–	–
<i>Самосев</i>										
1	6,8	17,4	18,8	21,6	36,6	37,6	32,4	25,4	27,0	–
5	12,5	14,8	13,4	15,4	16,3	19,0	16,4	16,2	–	–
6	10,8	13,4	19,2	20,4	31,6	32,0	26,0	20,8	24,6	–
7	10,2	13,8	18,8	26,4	34,2	32,0	23,0	24,8	28,3	–
<i>Среднее</i>	10,1	14,9	17,6	21,0	29,7	30,2	24,5	21,8	26,6	–

Деревья естественного происхождения находятся в менее выгодных условиях по сравнению с культурами, т. к. располагаются не в микропонижениях (дно борозды), но они появились на лесокультурных площадях раньше, чем были посажены сеянцы с ЗКС. Это может объяснять их промежуточное положение по возрасту кульминации текущего прироста по высоте между культурами, созданными сеянцами с ОКС и ЗКС.

Работы по замеру приростов деревьев по высоте осложнялись тем, что часть сеянцев, посаженных в дно борозд, была занесена песком на глубину до 10 см, из-за чего приросты в высоту в первые 2–3 года роста не всегда удавалось установить точно.

Ход роста по высоте культур сосны, созданных посадочным материалом с ОКС и ЗКС, а также самосева сосны на участках лесных культур показан на рис. 2.

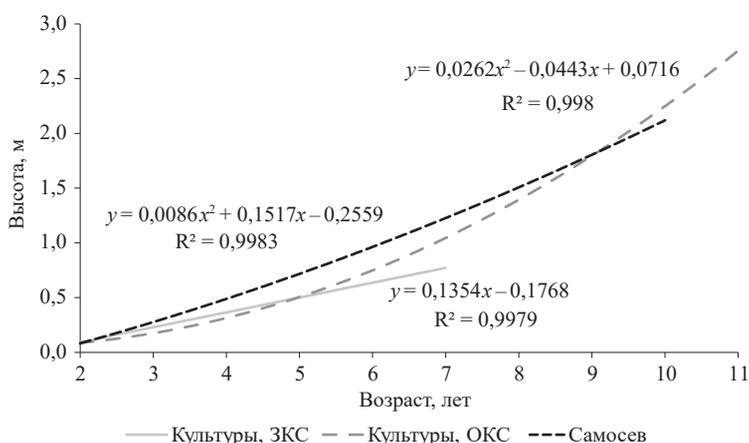


Рис. 2. Ход роста по высоте культур и самосева сосны обыкновенной
Fig. 2. The course of growth in height of crops and self-seeding of Scots pine

Отставание в росте по высоте культур сосны от деревьев естественного происхождения в первые годы после посадки объясняется адаптационным периодом растений и необходимостью восстановления поврежденной корневой системы (для сеянцев с ОКС). Более медленный рост и низкая сохранность культур, созданных в 2017 и 2018 гг., могут быть связаны с засушливыми погодными условиями в период с 2019 по 2022 гг. Если с 2013 по 2018 гг. за год выпадало в среднем 325 мм осадков, то с 2019 по 2022 гг. — только 247 мм.

Кроме годового объема осадков, важными факторами, влияющими на сохранность и рост лесных культур, вероятно, являются количество осадков и температура воздуха в мае. С началом вегетационного периода (конец апреля — начало мая) сосна активно начинает расти в высоту, т. е. дефицит влаги в этот период будет снижать текущий прирост. На рис. 3 приведена динамика количества осадков и средней температуры воздуха в мае по данным метеорологической станции в с. Ключи. В 2019–2023 гг. условия для роста растений в мае оказались неблагоприятными. Недостаточное количество месячных осадков (4–14 мм, при среднем значении 7 мм) сопровождалось высокими для мая средними температурами воздуха (от 12,3 до 18,8 °С, при среднем значении 16 °С). Для сравнения, в период с 2013 по 2018 гг. в мае выпадало в среднем 39,3 мм осадков, а средняя температура воздуха была на 3 °С ниже.

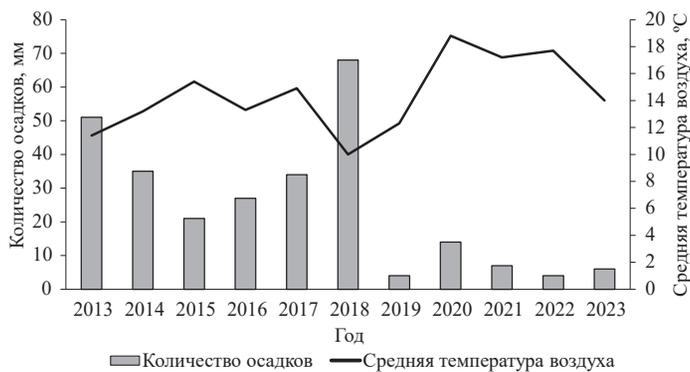


Рис. 3. Количество осадков и средняя температура воздуха в мае за период с 2013 по 2023 гг.

Fig. 3. The precipitation and average air temperature in May for the period from 2013 to 2023

Май 2018 г. характеризовался как нетипично дождливый и холодный: за месяц выпало 68 мм осадков, средняя температура воздуха составляла 10 °С, однако несмотря на благоприятную погоду весной 2018 г., большая часть площади (578,7 га, или 64 %) лесных культур, созданных в этот год посадочным материалом с ЗКС, была позднее списана по причине их гибели из-за засухи в мае–июле 2019 г. и мае–июне 2020 г. При этом лесные культуры, сформированные в тот же год посадочным материалом с ОКС (98,3 га), сохранились. Последнее может свидетельствовать о лучшем соответствии семян с ОКС лесорастительным условиям ленточных боров Алтайского края.

Выводы

1. На обследованных участках средняя сохранность лесных культур, созданных сеянцами с ЗКС, составила 44,4 %, с ОКС – 72,5 %. Однако по полученным данным нельзя сделать однозначного заключения о лучшей сохранности культур из материала с ОКС. Для проверки гипотезы необходимо включить в выборку больше участков лесных культур, высаженных в различные годы при вариативных погодных условиях.

2. Из 9 изученных участков культур требованиям к молоднякам, площади которых подлежат отнесению к лесопокрытым землям, соответствуют только 3 участка, сформированные посадочным материалом с ОКС до 2016 г. Лесные культуры, высаженные в 2017 и 2018 гг., имеют значительно худшие сохранность и рост из-за череды засушливых лет (2019–2022 гг.).

3. В условиях аридизации климата густота посадки лесных культур 2–3 тыс. шт./га, применяемая в случае использования сеянцев с ЗКС в Ключевском лесничестве, не способна обеспечить к моменту отнесения несомкнувшихся лесных культур к лесопокрытым землям требуемую густоту 2,5 тыс. шт./га. Рекомендуется увечить густоту посадки сеянцев с ЗКС до 4–6 тыс. шт./га.

4. На крупноплощадной гари культуры сосны, созданные посадочным материалом с ОКС, в первые 5–7 лет после посадки уступают по средней высоте деревьям естественного происхождения, однако к возрасту 9 лет догоняют их по данному показателю.

5. Количество самосева на исследуемой крупноплощадной гари спустя 12,5 лет после пожара не превышает 66 шт./га, что недостаточно для успеш-

ного естественного лесовосстановления. Это значит, что без искусственного лесовосстановления исследуемые участки несколько десятков лет были бы не облесены. В связи с этим на крупноплощадных гарях искусственный способ лесовосстановления должен оставаться предпочтительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Башегуров К.А., Белов Л.А., Залесов С.В., Осипенко А.Е., Попов А.С., Розинкина Е.П. Эффективность естественного и искусственного лесовосстановления на гарях Западно-Сибирского северо-таежного равнинного лесного района // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 2(85). С. 4–15.

Bashegurov K.A., Belov L.A., Zalesov S.V., Osipenko A.E., Popov A.S., Rozinkina E.P. Efficiency of Natural and Artificial Reforestation in the Burnt out Areas of the West Siberian North Taiga Lowland Forest Region. *Lesy Rossii i khozyajstvo v nih* = Forests of Russia and Economy in Them, 2023, no. 2(85), pp. 4–15. (In Russ.).

<https://doi.org/10.51318/FRET.2023.39.51.001>

2. Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Пак К.А., Го Л., Чэн Т. Особенности структуры молодняков, сформировавшихся на участках лесных культур // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. XLI, № 2. С. 133–138.

Gavrilova O.I., Gryaskin A.V., Pak K.A., Go L., Then T. Peculiarities of the Structure of Young Stands Formed on Forest Plantation Plots. *Khvoynyye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2023, vol. XLI. no. 2, pp. 133–138. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-2-133-138>

3. Дебков Н.М. Опыт создания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 5. С. 192–200.

Debkov N.M. Experience in the Creation of Forest Plantations Using Container Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 5, pp. 192–200. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-192-200>

4. Залесов С.В., Осипенко А.Е., Толстикова А.Ю., Усов М.В., Гоф А.А., Савин В.В. Воспроизводство и омоложение ленточных боров Алтайского края. Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. 357 с.

Zalesov S.V., Osipenko A.E., Tolstikova A.Yu., Usov M.V., Gof A.A., Savin V.V. *Reproduction and Rejuvenation of Ribbon Pine Forests in the Altai Territory*. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University Publ., 2023. 357 p. (In Russ.).

5. Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 2. С. 5–16.

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P., Paramonov A.A. Forest Crops at Spot Mounds after Excavator Soil Cultivation. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-2-5-16>

6. Корчагов С.А., Грибов С.Е., Карбасникова Е.Б., Карбасников А.А. Приживаемость и рост смешанных культур ели и лиственницы // Лесотехн. журн. 2017. Т. 7, № 1(25). С. 80–87.

Korchagov S.A., Gribov S.E., Karbasnikova E.B., Karbasnikov A.A. The Survival and Growth of Mixed Cultures of Spruce and Larch. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2017, vol. 7, no. 1(25), pp. 80–87. (In Russ.). <https://doi.org/12737/25197>

7. Маленко А.А., Чичкарев А.С., Завалишин С.И., Малиновских А.А., Курсикова Е.С. Выращивание лесных культур сосны с закрытой корневой системой в условиях степи на юге Западной Сибири // Лесохоз. информ. 2023. № 3. С. 103–116.

Malenko A.A., Chichkarev A.S., Zavalishin S.I., Malinovskih A.A., Kursikova E.S. Growing Forest Crops of Pine with a Closed Root System in the Steppe in the South of Western Siberia. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2023, no. 3, pp. 103–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.08>

8. Осипенко А.Е., Залесов С.В. Разновозрастность сосновых древостоев как фактор гармонизации системы лесохозяйственных мероприятий в ленточных борах Алтайского края // Лесотехн. журн. 2023. Т. 13, № 1(49). С. 129–145.

Osipenko A.E., Zalesov S.V. Age Differences of Pine Stands as a Factor of Harmonization of the System of Forest Management Activities in Ribbon Forests of the Altai Krai. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2023, vol. 13, no. 1(49), pp. 129–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9>

9. Пеккоев А.Н., Неронова Я.А. Влияние вида посадочного материала и способов обработки почвы на сохранность, рост и структуру древесины 24-летних культур ели // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2024. Вып. 247. С. 42–55.

Pekkoiev A.N., Neronova Ya.A. The Effects of the Stocking Material Type and Soil Pre-Treatment Methods on Survival, Growth and Wood Structure in 24-Year-Old Spruce Crops. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2024, iss. 247, pp. 42–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.247.42-55>

10. Родин А.Р., Родин С.А. Повышение результативности выращивания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой // Лесн. вестн. / Forestry bulletin. 2010. Т. 74, № 5. С. 7–10.

Rodin S.A., Rodin A.R. Promotion of Forest Plantations Performance with Containerized Planting Stock. *Lesnoy vestnik = Forestry bulletin*, 2010, vol. 74, no. 5, pp. 7–10. (In Russ.).

11. Романов Е.М., Демаков Ю.П., Нуреева Т.В., Заболотских П.В. О необходимости создания учебно-опытных стационаров для разработки и внедрения интенсивных технологий лесовыращивания и подготовки специалистов лесного дела // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 2(46). С. 5–26.

Romanov E.M., Demakov Yu.P., Nureeva T.V., Zabolotskikh P.V. On the Necessity to Establish the Scientific-Experimental Stations to Elaborate and Implement the Intensive Technologies for Forest Growing and Training of Foresters. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2020, no. 2(46), pp. 5–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2020.2.5>

12. Салтыков А.Н. Системная целостность и сходство пространственно-возрастной структуры подроста сосны обыкновенной и сосны крымской // Бюл. Гос. Никитск. ботан. сада. 2021. № 141. С. 44–54.

Saltykov A.N. Systemic Integrity and Similarity of the Spatial and Age Structure of the Undergrowth of Scots Pine and Crimean Pine. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada = Bulletin of the State Nikita Botanical Garden*, 2021, no. 141, pp. 44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2021-141-44-54>

13. Сахнов В.В., Прокопьев А.П., Галиуллин И.Р., Глушко С.Г. Рост и развитие лесных культур сосны обыкновенной, созданных посадочным материалом с закрытой и открытой корневой системой, в различных условиях Республики Татарстан // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 2. С. 38–48.

Sakhnov V.V., Prokop'ev A.P., Galiullin I.R., Glushko S.G. Scots Pine Growth and Development Created by Planting Material with Root-Balled and Bareroot Systems in Various Forestgrowing Conditions of Tatarstan Republic. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 38–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-2-38-48>

14. Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Цепляев А.Н., Корнеев А.Б., Похваленко В.А., Вариводина И.Н., Трегубова А.О. Приживаемость и сохранность лесных культур сосны обыкновенной, высаженной с закрытой корневой системой в условиях лесостепной зоны европейской части Российской Федерации // Астраханск. вестн. эколог. образ. 2023. № 3(75). С. 152–161.

Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Tseplyaev A.N., Korneev A.B., Pokhvalenko V.A., Varivodina I.V., Tregubova A.O. Survival and Safety of Forest Crops of Scots

Pine, Planted with a Closed Root System in the Conditions of the Forest-Steppe Zone of the European Part of the Russian Federation. *Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* = Astrakhan Bulletin of Ecological Education, 2023, no. 3(75), pp. 152–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2023-3-152-161>

15. Харламова Н.Ф., Бондарович А.А., Козлова Д.С., Плехова А.В. Изменчивость увлажненности территории лесостепной и степной зон Алтайского края за 1982–2013 гг. // География и природопользование Сибири. 2014. Вып. 18. С. 206–215.

Kharlamova N.F., Bondarovich A.A., Kozlova D.S., Plekhova A.V. Variability of Moisture Content in the Forest-Steppe and Steppe Zones of the Altai Territory for 1982–2013. *Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri*, 2014, iss. 18, pp. 206–215. (In Russ.).

16. Чернов Н.Н., Соловьев В.М., Нагимов З.Я. Методические основы лесокультурных исследований. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 422 с.

Chernov N.N., Solov'ev V.M., Nagimov Z.Ya. *Methodological Foundations of Forest Culture Research*. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University Publ., 2012. 422 p. (In Russ.).

17. Cao S., Tian T., Chen L., Dong X., Yu X., Wang G. Damage Caused to the Environment by Reforestation Policies in Arid and Semi-Arid Areas of China. *Ambio*, 2010, vol. 39, pp. 279–283. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0038-z>

18. Fargione J., Haase D.L., Burney O.T., Kildisheva O.A., Edge G., Cook-Patton S.C., Chapman T., Rempel A., Hurteau M.D., Davis K.T., Dobrowski S., Enebak S., De La Torre R., Bhuta A.A.R., Cabbage F., Kittler B., Zhang D., Guldin R.W. Challenges to the Reforestation Pipeline in the United States. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, vol. 4, art. no. 629198. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.629198>

19. Häggström B., Hajek J., Nordin A., Öhlund J. Effects of Planting Position, Seedling Size, and Organic Nitrogen Fertilization on the Establishment of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) Seedlings. *Forests*, 2024, vol. 15, no. 4, art. no. 703. <https://doi.org/10.3390/f15040703>

20. Huebner L., Fadhil Al-Quraishi A.M., Branch O., Gaznayee H.A.A. New Approaches: Use of Assisted Natural Succession in Revegetation of Inhabited Arid Drylands as Alternative to Large-Scale Afforestation. *SN Applied Sciences*, 2022, vol. 4, art. no. 80. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-04951-y>

21. Johansson K., Hajek J., Sjölin O., Normark E. Early Performance of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* – a Comparison between Seedling Size, Species, and Geographic Location of the Planting Site. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, vol. 30, iss. 5, pp. 388–400. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.987808>

22. Montagnoli A., Lasserre B., Terzaghi M., Byambadorj S.-O., Nyam-Osor B., Scipra G.S., Chiatante D. Fertilization Reduces Root Architecture Plasticity in *Ulmus pumila* Used for Afforesting Mongolian Semi-Arid Steppe. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, no. 878299. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.878299>

23. Zhang T., Song L., Zhu J., Wang G., Li M., Zheng X., Zhang J. Spatial Distribution of Root Systems of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Trees with Different Ages in a Semi-Arid Sandy Region of Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 483, art. no. 118776. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118776>

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

Научная статья

УДК 630*453+595.768.24(571.1)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-77-90

Состояние кедровников на южной границе ареала Западной Сибири

Н.М. Дебков, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [H-1146-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, просп. Академический, д. 10/3, г. Томск, Россия, 634055; nikitadebkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.01.24 / Одобрена после рецензирования 23.04.24 / Принята к печати 25.04.24

Аннотация. По всей планете в бореальных лесах происходят деструктивные процессы, которые обусловлены и катализируются изменением климата и последующим воздействием вредителей леса. В Сибири наиболее ярко это явление выражено в кедровых лесах на южной границе таежной зоны. С учетом социальной значимости припоселковых кедровников целью исследования была оценка состояния Лучаново-Ипатовского кедровника Томской области. В 2016–2017 гг. на его территории насчитывалось 2 очага сибирского шелкопряда и в последующем активно размножались стволовые вредители. На землях массива проведено полное наземное обследование и дана визуальная оценка санитарного состояния деревьев сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour). Заложена 21 пробная площадь, отобрано 45 образцов кернов древесины пропорционально от живых, усыхающих и погибших деревьев. Также выполнено дешифрирование космоснимков Лучаново-Ипатовского кедровника за период с 2015 по 2023 гг. Установлено, что 75 % площади массива занято насаждениями кедра. Обеспеченность подростом предварительных генераций неудовлетворительная. Статистический анализ показал, что стволовые вредители наносили урон деревьям разных поколений и диаметров ($p = 0,09 > 0,05$ и $p = 0,30 > 0,05$ соответственно). Ход роста с убраным возрастным трендом у групп деревьев разного состояния позволил выявить отсутствие достоверной разницы в радиальном приросте до массового размножения сибирского шелкопряда ($p = 0,06 > 0,05$), но она появилась после вспышки численности ($p = 0,04 < 0,05$). Именно деревья, ослабленные шелкопрядом, и были атакованы стволовыми вредителями. По нашим данным, общая площадь 2 изолированных очагов размножения сибирского шелкопряда составила 34 га (10 % от всей площади кедровых насаждений). В этих очагах и произошло массовое размножение стволовых вредителей. Оценка нарушенных участков показала, что их размер составляет около 235 га, или 70 % территории кедровых насаждений. Наземные исследования подтвердили результаты дешифрирования космоснимков, и в среднесрочной перспективе ожидается снижение лесообразующей роли кедра в данном массиве, вплоть до полной гибели чистых по составу и со значительным участием кедра насаждений на 1/2 сегодняшней площади этих древостоев.

Ключевые слова: кедр сибирский, *Pinus sibirica* Du Tour, санитарное состояние, радиальный прирост, сибирский шелкопряд, *Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov, стволовые вредители, Западная Сибирь, деградация кедровников, изменение климата, волны тепла
Благодарности: Исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание ИМКЭС СО РАН, регистрационный номер проекта 1022042600048-9-1.5.1).

Для цитирования: Дебков Н.М. Состояние кедровников на южной границе ареала Западной Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 77–90.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-77-90>

Original article

The Condition of Siberian Stone Pine Forests on the Southern Border of Western Siberia Range

Nikita M. Debkov, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [H-1146-2019](https://orcid.org/0000-0003-3791-0369), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademicheskyy, 10/3, Tomsk, 634055, Russian Federation; nikitadebkov@yandex.ru

Received on January 30, 2024 / Approved after reviewing on April 23, 2024 / Accepted on April 25, 2024

Abstract. Destructive processes are taking place in boreal forests all over the planet, driven and catalyzed by climate change and the subsequent impact of forest pests. In Siberia, this pattern is most pronounced in Siberian stone pine forests on the southern border of the taiga zone. Taking into account the social significance of the village Siberian stone pine forests, the aim of the study has been to assess the condition of the forest cover of the Luchanovo-Ipatovskyy Siberian stone pine forest in the Tomsk Region. In 2016–2017, there were 2 foci of the Siberian moth on its territory, and subsequently, stem pests have actively multiplied. A complete ground survey has been carried out on the lands of the forest area and a visual assessment of the sanitary condition of Siberian Stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) trees has been given. 21 sample plots have been laid, 45 samples of wood cores have been taken proportionally from living, shrinking and dead trees. Also, the interpretation of satellite images of the Luchanovo-Ipatovskyy Siberian stone pine forest for the period from 2015 to 2023 has been carried out. It has been established that 75 % of the forest area under study is occupied by Siberian stone pine stands. The provision of undergrowth for preliminary generations is unsatisfactory. Statistical analysis has shown that stem pests have damaged trees of different generations and different diameters ($p = 0.09 > 0.05$ and $p = 0.30 > 0.05$, respectively). The course of growth with the age trend removed in groups of trees of different conditions has revealed the absence of a reliable difference in radial increment before the mass reproduction of the Siberian moth ($p = 0.06 > 0.05$), but it has appeared after the population outbreak ($p = 0.04 < 0.05$). It was the trees weakened by the Siberian moths that have been attacked by stem pests. According to our data, the total area of 2 isolated foci of the Siberian moth reproduction has been 34 ha (10 % of the total area of Siberian stone pine stands). It was in these foci that the mass reproduction of stem pests has occurred. An assessment of the disturbed areas has shown that their size is approximately 235 ha, or 70 % of the territory of Siberian stone stands. Ground-based studies have confirmed the results of space imagery interpretation, and in the medium term, a decrease in the forest-forming role of Siberian stone pine in this forest area is expected, up to the complete destruction of pure-composition stands and the ones with significant participation of Siberian stone pine in 1/2 of the current area of these stands.

Keywords: Siberian stone pine, *Pinus sibirica* Du Tour, sanitary condition, radial increment, Siberian moth, *Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov, stem pests, Western Siberia, degradation of Siberian Stone pine forests, climate change, heat waves

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment for the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project registration no.1022042600048-9-1.5.1).

For citation: Debkov N.M. The Condition of Siberian Stone Pine Forests on the Southern Border of Western Siberia Range. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 77–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-77-90>

Введение

Усыхание древостоев стало перманентным явлением для бореальных лесов планеты [10, 16, 20]. В ряду основных причин данного глобального процесса учеными отмечаются эпифитотии грибных, бактериальных и вирусных заболеваний [17], хвое- и листогрызущих и стволовых вредителей леса [15]. С нашей точки зрения, ввиду широкомасштабности деструктивных процессов в лесном покрове в качестве триггера деградации хвойных лесов следует назвать изменение климата, в т. ч. возрастание его засушливости [14]. При этом, как правило, ослабленные в результате трансформации погодно-климатической системы древесные сообщества, и в первую очередь хвойные леса, становятся более подвержены различного рода заболеваниям, поражаемости насекомыми, воздействию факторов абиотической природы (например, лесным пожарам) [11, 13].

Одной из наиболее важных лесообразующих пород Сибири является сосна кедровая сибирская, или кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour), которая занимает 40 млн га лесопокрытой площади этого региона [5], что территориально сопоставимо с такой европейской страной, как Швеция. В связи с этим и с учетом не только экологического, но и социального значения кедровых лесов целью исследования была оценка состояния припоселкового Лучаново-Ипатовского кедровника Томской области.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран один из массивов припоселковых кедровников – Лучаново-Ипатовский кедровник. Данный массив расположен в непосредственной близости от областного центра (25 км), в окрестностях д. Ипатово и с. Лучаново (рис. 1). Лучаново-Ипатовский кедровник известен тем, что на его территории расположена резервация сибирского шелкопряда *Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov и периодически происходят его массовые размножения (рис. 1, обозначение 1). Последняя зафиксированная вспышка массового размножения сибирского шелкопряда была в 2016–2017 гг., и очаг площадью около 12 га подавили с помощью бактериальных препаратов. В данной местности также распространены шестизубчатый короед *Ips sexdentatus* (Börn.) и другие вторичные стволовые вредители. Для предотвращения их деятельности здесь периодически проводятся санитарные рубки (рис. 1, обозначение 2).

Значимость исследуемому массиву кедровых лесов придает и его статус – лесной генетический резерват, т. е. он входит в Единый генетико-селекционный комплекс (ЕГСК) и представляет ценность как уникальная составляющая генофонда кедра на южном пределе его распространения.

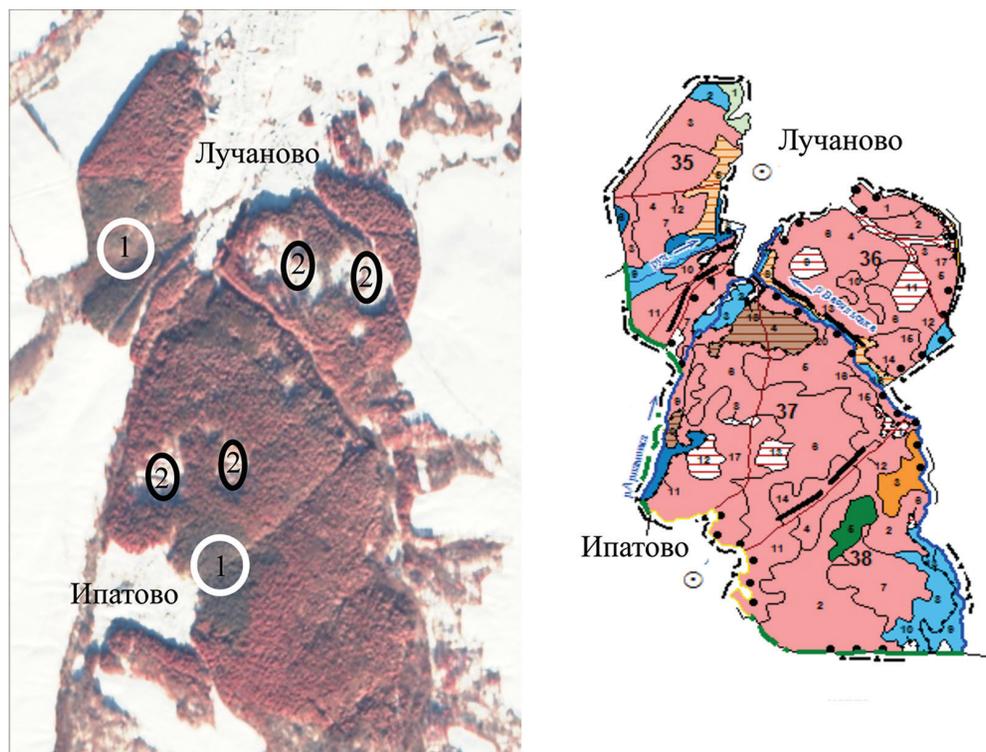


Рис. 1. Лучаново-Ипатовский кедровник (слева – космоснимок от 16.11.2019 г., справа – план лесонасаждений от 2013 г.)

Fig. 1. The Luchanovo-Ipatovskiy Siberian stone pine forest (left – satellite image from 16.11.2019, right – stand map from 2013)

В ходе научных работ глазомерно осуществляли оценку деревьев кедровника с использованием утвержденной шкалы категорий жизненного состояния (приказ Министерства природных ресурсов от 9 нояб. 2020 г. № 910 «Об утверждении Порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологических обследований»). По санитарному состоянию деревья разделили на 3 группы: жизнеспособные (I–III категории), усыхающие (IV категория), погибшие (V категория). В каждой группе отобрали по 15 деревьев, у которых взяли приростным буром Пресслера керны на высоте 1,3 м для оценки изменений в радиальном приросте кедровника сибирского. Данный показатель является индикатором состояния деревьев и позволяет ретроспективно охарактеризовать жизнеспособность как погибших, так и живых деревьев. Измерение ширины древесных колец проводилось с помощью комплекса LINTAB-5 с пакетом компьютерных программ TSAP [19] с точностью 0,01 мм. В дальнейшем индивидуальные древесно-кольцевые ряды подвергались детрендингу. Для удаления возрастного тренда деревьев осуществляли стандартизацию индивидуальных серий прироста с помощью сплайн-функции (окно сплайна – 67 % от длины ряда, 50%-й уровень подавления дисперсии). Эта процедура выполнялась через программу CRONOL.

Также анализировались таксационные и картографические материалы лесоустройства 2013 г. по всему Лучаново-Ипатовскому кедровнику. Был построен профиль высот по маршруту с. Лучаново – Лучаново-Ипатовский кедровник – д. Ипатово с помощью ресурса <https://www.dzz.by/tools/elevation/>.

Космоснимки Sentinel получены с помощью ресурса <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. Для изучаемой территории были выбраны практически безоблачные (облачность менее 1 %) снимки Sentinel-2A L1C за период ноябрь–декабрь 2015, 2017, 2020 и 2023 гг. Взято именно это время, поскольку уже опала листва и сформировался устойчивый снежный покров, но на кронах снег отсутствовал. Космические фотографии проанализированы в разных спектрах (комбинации каналов (4-3-2, 8-4-3, 12-11-4), индексы NDVI, SWIR, NDWI, Moisture index, NDSI). С помощью функции «Classification of Sentinel2 data as result of ESA's Scene classification algorithm» [18] выполнено дешифрирование космоснимков с целью оценки деградации лесного покрова. Уточнение дат дефолиации крон кедра сибирского в очагах массового размножения сибирского шелкопряда производилось по информации из системы глобального мониторинга лесного покрова, разработанной в Мэрилендском университете [12].

Для верификации данных дешифрирования космоснимков было проведено полное наземное обследование Лучаново-Ипатовского кедровника. Заложена 21 реласкопическая площадка (РПП) полнотомером Биттерлиха. Оценка древостоя давалась по 2 категориям: внешне здоровые деревья с зеленой кроной и отмирающие/погибшие деревья с дехромацией кроны. Для каждой РПП устанавливалась высота над уровнем моря и породный состав древостоя.

Оценку санитарного состояния древостоев давали с использованием шкалы, предложенной В.А. Алексеевым [1]. При сумме площадей сечения здоровых деревьев в пределах 80–100 % жизненное состояние древостоя оценивалось как здоровое, при 50–79 % – как ослабленное, при 20–49 % – как сильно ослабленное, при 19 % и ниже – как деградированное.

Камеральная обработка данных произведена в программе Statistica 10 с применением стандартных описательных статистик, непараметрических критериев оценки достоверности разности для 2 (тест Манна–Уитни) и нескольких (тест Краскела–Уоллиса) независимых переменных. Также выполнен множественный регрессионный анализ для установления связи между несколькими переменными.

Результаты исследования и их обсуждение

Характерной особенностью припоселковых кедровников Сибири в целом и Томской области в частности является их расположение среди агрокультурного ландшафта, т. е. они зачастую являются сохранившимися массивами некогда распространенной темнохвойной тайги [5]. Отсюда вытекает другая ключевая особенность припоселковых кедровников – они выступают в качестве перманентных очагов стволовых вредителей, в основном шестизубчатого короеда [2]. Данный вид в условиях таежной зоны не несет ощутимой угрозы кедровым лесам, этот вид вредителя вторичен. Он может оказывать деструктивное воздействие только после особенно мощной вспышки сибирского шелкопряда [9]. Причина наличия хронических очагов стволовых вредителей в припоселковых насаждениях состоит в зачастую неудовлетворительном санитарном состоянии кедровников [7]. В свою очередь, такое состояние древостоев обусловлено расположением кедровников не в той лесорастительной зоне (южная тайга сменилась подтаежной подзоной вследствие антропогенной деятельности), в которой они произрастали ранее (смещение зоны тайги привело к изменению некото-

рых климатических показателей), практически полным доминированием кедра в составе сообществ, относительно высоким возрастом деревьев, массовыми механическими повреждениями стволов кедра вследствие околота и иными повреждениями, вызванными орехосбором [5]. Кроме того, по нашим наблюдениям, многие кедровники произрастают в тех экотопах, где естественным образом они бы никогда не сформировались – на месте сосновых боров на супесчаных почвах.

Отличительной особенностью Лучаново-Ипатовского припоселкового кедровника является его высокое расположение в рельефе (рис. 2), что в условиях засух, отмечаемых в последнее десятилетие практически ежегодно [8], негативно влияет на состояние деревьев. Также его положение в рельефе объясняет наличие на такой небольшой территории первичного очага сибирского шелкопряда. Как показало изучение вспышки шелкопряда 1953–1957 гг. [9], резервации этого вредителя приурочены к повышенным элементам местности. Высота над уровнем моря с. Лучаново составляет около 105–115 м, а припоселкового кедровника – 140–180 м.

Рис. 2. Профиль высот, построенный по маршруту с. Лучаново – Лучаново-Ипатовский кедровник – д. Ипатово

Fig. 2. The elevation profile constructed along the route: Luchanovo Village – the Luchanovo-Ipatovskiy Siberian stone pine forest – Ipatovo Village



Общая площадь массива составляет 445 га, большая часть территории (75 %) приходится на кедровые насаждения (рис. 3). В основном встречаются древостои 110 и 140 лет, преобладающий тип леса – разнотравный. Насаждения среднеполнотные (0,5–0,6) с запасами 300–400 м³/га, т. е. достаточно производительные (II–III класс бонитета).

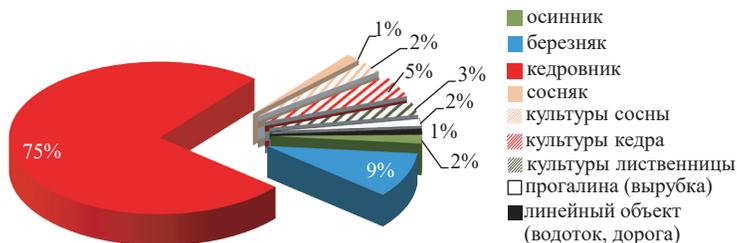


Рис. 3. Распределение территории Лучаново-Ипатовского кедровника по категориям земель и преобладающей породе

Fig. 3. The distribution of the Luchanovo-Ipatovskiy Siberian stone pine forest territory by land categories and predominant species

Важно отметить, что 54,5 % площади занято чистыми насаждениями, 19,1 % – древостоями с явным преобладанием кедр (6–8 ед.) и 26,4 % –

смешанными насаждениями, где доля кедрa варьирует в пределах 3–5 ед. В 70 % насаждений густота жизнеспособного подростa кедрa не превышает 0,5 тыс. шт./га (варьирование – 0,1–2 тыс. шт./га). Симптоматично, что именно в монодоминантных кедровниках численность вида не превышает 0,5 тыс. га. В смешанных же насаждениях в 1/2 случаев встречается 1–2 тыс. шт./га подростa. Средний возраст деревьев этой возрастной категории колеблется от 10 до 20 лет. Значимую площадь занимают березняки (9 %) и лесные культуры сосны, лиственницы и кедрa (10 %). Остальная площадь (6 %) занята осинниками, сосняками, прогалинами (как правило, на местах санитарных рубок прошлых лет) и линейными объектами (водотоками и дорогами). Стоит отметить, что лесные культуры лиственницы и сосны создавались в 1951 и 1961 гг. Они имеют хорошее состояние (большинство деревьев относятся к I–III категориям состояния, количество отпада лежит в пределах нормы, динамика пополнения этой категории не имеет патологического характера), о чем говорит и состав (10С и 7–8Л соответственно). Кедровые посадки выполнялись в последние 10–15 лет, и без систематических уходов они, скорее всего, погибнут.

Насаждение, в котором получены керны, как и многие другие древостои, состоит из 2 возрастных поколений. Учитывая, что отбор кернов производился на высоте 1,3 м, к значениям, приведенным в таблице, следует добавить около 20 лет [6]. Таким образом, старшее поколение образовано деревьями возрастом 150–160 лет, а младшее – 115–125 лет.

Характеристика деревьев кедрa сибирского в зависимости от санитарного состояния

The characteristics of Siberian stone pine trees depending on their sanitary condition

Показатель		Группа деревьев по санитарному состоянию, поколение					
таксационный	статистический	жизнеспособные		усыхающие		погибшие	
		старшее	младшее	старшее	младшее	старшее	младшее
Возраст	M±m, лет	135±2	105±5	136±3	93±6	133±5	99±3
	lim, лет	122–145	92–115	128–144	69–111	121–151	91–115
	σ, лет	7,3	10,8	7,3	13,8	11,3	7,9
	CV, %	5,4	10,2	5,4	14,8	8,4	7,9
Диаметр	M±m, см	37,6±3,5	25,1±3,9	54,4±2,7	36,5±2,8	47,6±4,2	39,9±3,0
	lim, см	15,7–57,8	21,2–29,0	47,7–63,3	25,3–48,8	33,9–61,1	28,5–58,2
	σ, см	12,5	5,5	5,9	8,4	10,2	9,6
	CV, %	33,3	22,0	10,9	23,1	21,5	24,1

Примечание: M±m – среднее с ошибкой; lim – размах показателя; σ – среднее квадратическое отклонение; CV – коэффициент вариации.

Статистический анализ подтвердил достоверную разницу между возрастными поколениями по всем категориям состояния: U-критерий Манна–Уитни, $p = 0,01 < 0,05$ для живых деревьев, $p = 0,03 < 0,05$ для усыхающих, $p = 0,01 < 0,05$ для погибших. При этом достоверной разницы в возрасте между этими группами деревьев не выявлено (ранговый дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса, $p = 0,09 > 0,05$), т. е. стволовые вредители повреждали деревья разных поколений.

Для живых и погибших деревьев не обнаружена разница между диаметрами по возрастным поколениям: U-критерий Манна–Уитни, $p = 0,23 > 0,05$ и $p = 0,15 > 0,05$ соответственно. Однако такая связь установлена для усыхающих

деревьев (U -критерий Манна–Уитни, $p = 0,01 < 0,05$). При этом достоверной разницы в диаметре между этими группами деревьев не зафиксировано (ранговый дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса, $p = 0,30 > 0,05$), т. е. стволовые вредители поселялись в деревьях разного диаметра.

Ход роста возрастных поколений по диаметру (рис. 4) показал, что младшее поколение появилось до пика «большого роста», но стало интенсивно развиваться вслед за прохождением этой фазы у старшего поколения; после пика роста у младшего поколения до массового размножения сибирского шелкопряда в 2016 г. сохранился устойчиво большой прирост по сравнению со старшим поколением; регрессивная динамика роста стабильна, т. е. насаждение снижало прирост, особенно старшее поколение, до 0,5 мм/год. Для здорового древостоя характерны циклические колебания прироста, в данном случае можно утверждать о планомерном ослаблении кедровника. Из рис. 4 следует, что в число основных причин здесь входит старение древостоя.

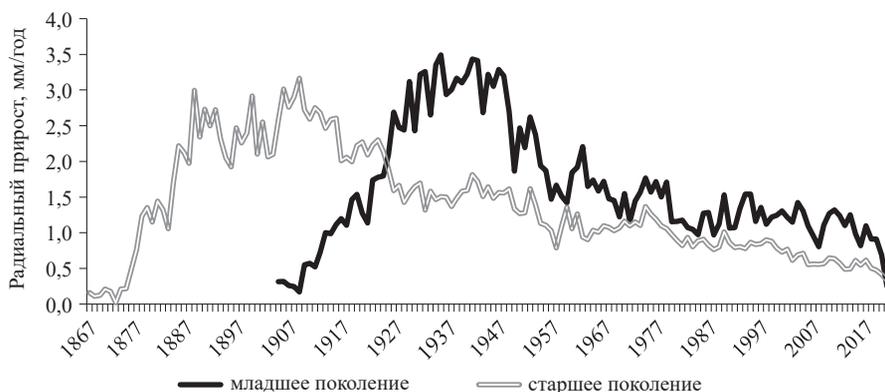


Рис. 4. Динамика радиального прироста кедра сибирского по возрастным поколениям

Fig. 4. The dynamics of radial increment of Siberian Stone pine trees by age generations

Различий в радиальном приросте до и после массового размножения сибирского шелкопряда у старшего поколения не выявлено (U -критерий Манна–Уитни, $p = 0,07 > 0,05$), но они установлены у младшего поколения (U -критерий Манна–Уитни, $p = 0,03 < 0,05$). При этом до вспышки шелкопряда радиальный прирост был достоверно выше у младшего поколения по сравнению со старшим (U -критерий Манна–Уитни, $p = 0,01 < 0,05$). После массового размножения сибирского шелкопряда разница исчезла (U -критерий Манна–Уитни, $p = 0,15 > 0,05$). То есть вспышка сибирского шелкопряда оказала не только прямое воздействие в виде обедания ассимиляционного аппарата у деревьев кедра сибирского, но и косвенное – воздействуя совокупно с резким изменением экологических условий, привела к падению прироста у младшего поколения. У старшего поколения прирост и без названной причины был очень низкий.

Анализ хода роста при исключенном возрастном тренде (детрендинг) у групп деревьев с разным состоянием показал (рис. 5), что достоверной разницы в радиальном приросте (ранговый дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса, $p = 0,06 > 0,05$) до массового размножения шелкопряда нет, но она появилась после вспышки численности (ранговый дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса, $p = 0,04 < 0,05$). То есть деревья, которые подверглись полному или частичному обеданию крон сибирским шелкопрядом, снизили прирост и были в первую

очередь атакованы стволовыми вредителями. На графике рис. 5 видно снижение годовых приростов по сравнению с тем, что было перед гибелью деревьев.

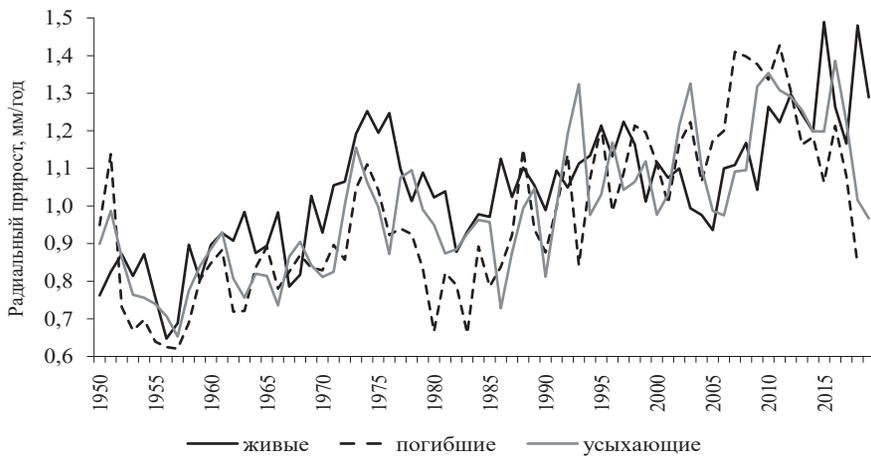


Рис. 5. Динамика радиального прироста (детрендинг) деревьев кедров сибирского в зависимости от санитарного состояния

Fig. 5. The dynamics of radial growth (detrending) of Siberian Stone pine trees depending on the sanitary condition

По данным системы глобального мониторинга лесного покрова Global Forest Watch установлено, что уже в 2017 г. в 2 очагах сибирского шелкопряда (площадью около 19 га в верхней части массива вблизи с. Лучаново и около 15 га вблизи д. Ипатово соответственно) произошло усыхание кедров. Как отмечено выше, по данным регионального Департамента лесного хозяйства и Томского филиала Центра защиты леса, размер очага сибирского шелкопряда ровнялся 12 га. По нашим данным, общая территория 2 изолированных очагов составила 34 га (10 % от площади кедровников массива), т. е. больше почти в 3 раза. Причина таких расхождений объясняется тем, что лесопатологическое обследование специалистами Томского лесничества проводилось на начальном этапе повреждения, когда очаги находились в инициальной стадии, и прошло несколько недель, прежде чем провели обработку бактериальным препаратом лепидоцидом. За это время гусеницы сибирского шелкопряда, как правило, проходят развитие до 6–7 возрастов и кратно увеличивают потребность в питании, что приводит к наиболее сильному объеданию крон деревьев и росту площади очагов.

Именно в этих очагах произошло массовое размножение стволовых вредителей, в последующем повлекшее масштабную деградацию ослабленного припоселкового кедровника (рис. 6). На рис. 6 приведены результаты дешифрирования с применением индекса NDVI, основанного на комбинации спектров (B8–B4)/(B8+B4) – где B4 – это красный, а B8 – ближний инфракрасный каналы – за период с 2015 по 2023 гг. За фоновое состояние лесного покрова Лучаново-Ипатовского кедровника принята информация с космоснимка 2015 г. (рис. 6, а), где нарушения отмечаются только в виде 4 участков санитарных рубок прошлых лет в местах распространения стволовых вредителей, на данных участках впоследствии созданы лесные культуры кедров. В 2016–2017 гг. произошла вспышка сибирского шелкопряда на территории массива, и это четко отображается на космоснимке (рис. 6, б), где визуализируется более крупный очаг к юго-западу от с. Лучаново и очаг меньшей площади к северо-востоку от д. Ипатово.

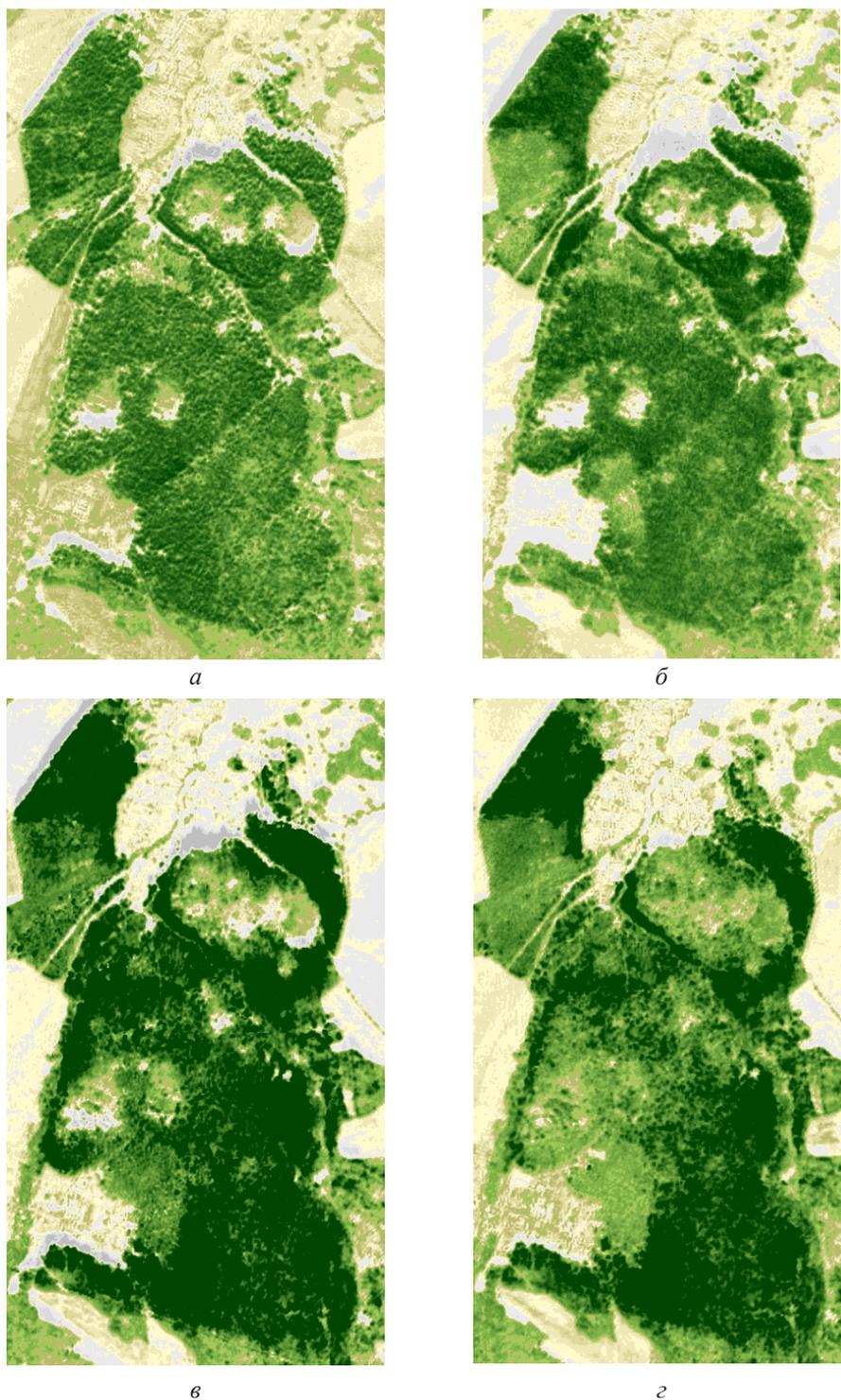


Рис. 6. Дешифрирование Лучаново-Ипатовского кедровника: *a* – космоснимок от 20.11.2015; *б* – космоснимок от 31.12.2017; *в* – космоснимок от 28.11.2020; *г* – космоснимок от 10.11.2023

Fig. 6. The interpretation of satellite images of the Luchanovo-Ipatovsky Siberian stone pine forest: *a* – from 20.11.2015; *б* – from 31.12.2017; *в* – from 28.11.2020; *г* – from 10.11.2023

В дальнейшем в течение нескольких лет отмечалось массовое размножение стволовых вредителей, пик которого пришелся на период до 2020 г., на космоснимке (рис. 6, в) хорошо видно сильную деградацию лесного покрова в центральной части Лучаново-Ипатовского кедровника. На сегодняшний день процессы деградации снизились (рис. 6, з), и площадь нарушенных участков в совокупности составляет (шелкопряdnики+короедники) около 235 га, т. е. почти 1/2 массива, или 70 % его площади. В результате дешифрирования космоснимков выявлено, что сомкнутые кедровые насаждения сохранились отдельными участками, наиболее крупный из которых находится юго-восточней д. Ипатово (рис. 6, з). Однако повреждена большая часть кедровых насаждений, поэтому существует риск их значительного усыхания в течение 5–10 лет, по крайней мере, чистых древостоев и древостоев с явным преобладанием кедра.

Наземное обследование показало, что только 17 % кедровых насаждений не имеют видимых следов воздействия стволовых вредителей. Причем 40 % насаждений без видимых признаков присутствия вредителей характеризуются повреждениями до 20 % (в среднем 16 %), т. е. они относятся к несильно ослабленным древостоям. Около 47 % кедровников свойственны повреждения от 20 до 50 % (в среднем 40 %), т. е. они ослаблены в средней степени. И 13 % древостоев повреждены на от 51 до 80 % (в среднем 63 %) – это значительно ослабленные насаждения. Доля зараженных деревьев в среднем составляет 27 ± 5 % (лимиты 1–75 %), а показатель участия в составе сообществ других древесных видов равен 14 ± 4 % (лимиты 1–54 %).

Анализ корреляционных зависимостей показал, что состояние кедровников не связано с высотой над уровнем моря ($r = 0,19 \pm 0,45$, $p = 0,98 > 0,05$), но определяется наличием и количеством сопутствующих пород в составе сообществ ($r = 0,77 \pm 0,09$, $p = 0,01 < 0,05$). Таким образом, подтверждается факт большей устойчивости смешанных насаждений.

Перспективы состояния Лучаново-Ипатовского кедровника обусловлены погодно-климатическими явлениями, от которых в т. ч. зависит состояние популяций вредителей леса. Проблема заключается в том, что в период с 1971 по 1990 гг. средние суммы температур за период активной вегетации в южной части Томской области изменялись в пределах 1500–1800 °С, а в 2 последних десятилетия они повсеместно превысили 2000 °С, в отдельные годы (в 2012 и 2020 гг., когда и были самые масштабные лесные пожары) достигали более 3000 °С [8]. Рост температурного фона становится причиной и увеличения продолжительности вегетационного периода за последние 20 лет [4], что не может не приводить к повышению продуктивности лесных экосистем. Например, на рис. 5 виден восходящий тренд по приросту для живых деревьев, он «перебивает» естественное возрастное снижение прироста по диаметру.

Однако лимитирующим фактором являются экстремальные положительные температуры в течение вегетационного периода. Установлено, что от 30 до 60 % всех волн тепла за историю метеонаблюдений (около 150 лет) на территории Томской области зафиксировано после 2000 г. [8]. Число дней с максимальной температурой воздуха (более 25 °С) составляет в южной части области около 40 дней, с рекордами 60–70 дней за вегетацию в 2012 и 2016 гг. [8]. Развитие ситуации с трансформацией климата не вызывает оптимизма, поскольку по югу Западной Сибири прогнозируется увеличение летних температур на 2–3 °С при снижении количества осадков на 5–10 % к середине XXI в. [3].

Лесные экосистемы уже реагируют на происходящее изменение климата, в частности активизировались стволовые вредители. Повсеместно стало отмечаться такое явление, как «зеленый сухостой» – это деревья, заселенные жуками в начале лета с отложением яиц, из которых вылупились гусеницы, позднее превратившиеся в имаго и покинувшие кормовое растение, при наличии живой кроны. Данное явление происходит в случае длительных сильных засух, когда деревья не могут активизировать защитные механизмы и вырабатывать достаточный объем смолы. Дехромация кроны происходит только на следующий год в весенне-летний период, что и определяет такое название как «зеленый сухостой».

Заключение

Припоселковые кедровники являются особенностью Томской области и наиболее известны из рукотворных лесов Азиатской части России. История их формирования берет начало с освоения Сибири, когда благодаря питательным орешкам крестьяне массово сохраняли кедр в близлежащих лесах к селам и деревням. В итоге за 4 столетия только в Западной Сибири сформировались тысячи гектаров кедровников, которые в значительной степени определяют южную границу ареала кедра сибирского на равнине и важны как хранилище ценного генофонда, адаптированного к местным условиям.

С начала XXI в. отмечается изменение климата, в т. ч. его потепление, увеличение засушливости, снижение количества осадков и рост частотности экстремальных погодных явлений. Это сильно влияет на состояние лесных фитоценозов, как непосредственно, так и косвенно – через состояние популяций стволовых вредителей, которые активно пользуются ослаблением деревьев и древостоев. В случае с Лучаново-Ипатовским кедровником первичными факторами наращивания численности стволовых вредителей выступили сильная вспышка сибирского шелкопряда и систематические засухи, приведшие к ослаблению кедровых насаждений, занимающих повышенные места рельефа. Усиливает деградационные процессы простая форма насаждений с доминированием кедра сибирского в условиях агроландшафта на южной границе ареала в пределах Западной Сибири. В среднесрочной перспективе ожидается снижение лесообразующей роли кедра в данном массиве, вплоть до полной гибели чистых по составу и со значительным участием кедра насаждений на 1/2 площади массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
Aleksseev V.A. Diagnostics of the Vitality of Trees and Stands. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1989, no. 4, pp. 51–57. (In Russ.).
2. Бех И.А., Кривец С.А., Бисирова Э.М. Кедр – жемчужина Сибири. Томск: Печатная мануфактура, 2009. 50 с.
Bekh I.A., Krivets S.A., Bisirova E.M. *Siberian Stone Pine – the Pearl of Siberia*. Tomsk, Pechatnaya Manufaktura Publ., 2009. 50 p. (In Russ.).
3. Глобальные изменения климата и Сибирский Федеральный округ. На пути к адаптации. СПб.: Научно-технологические технологии, 2021. 12 с.

Global Climate Change and the Siberian Federal District. On the Way to Adaptation. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2021. 12 p. (In Russ.).

4. Горбатенко В.П., Волкова М.А., Носырева О.В., Кузевская И.В. Современные тенденции климатических характеристик, влияющих на развитие транспортной системы Томской области // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 7, № 4. С. 71–95.

Gorbatenko V.P., Volkova M.A., Nosyрева O.V., Kuzhevskaya I.V. Modern Trends in Climatic Characteristics Affecting the Development of the Transport System of the Tomsk Region. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* = *Fundamental and Applied Climatology*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 71–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-4-71-95>

5. Данченко А.М., Бех И.А. Кедровые леса Западной Сибири. Томск, 2010. 424 с. Danchenko A.M., Bekh I.A. *Cedar Forests of Western Siberia*. Tomsk, 2010. 424 p. (In Russ.).

6. Дебков Н.М. Основа роста и развития дендроценозов, сформировавшихся из сохранный подрост // *Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология*. 2012. № 4(20). С. 162–170.

Debkov N.M. Retrospective Analysis of Forest Stands Preliminary Generations Formation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*, 2012, no. 4(20), pp. 162–170. (In Russ.).

7. Дебков Н.М., Данченко А.М. Припоселковые кедровники Томской области. Проблемы устойчивого лесопользования // *Сиб. лесн. журн.* 2014. № 3. С. 127–139.

Debkov N.M., Danchenko A.M. The Siberian Stone Pine Stands Near Settlements in Tomsk Region. *Problems of Sustainable Forest Use. Sibirskij lesnoj zhurnal* = *Siberian Journal of Forest Science*, 2014, no. 3, pp. 127–139. (In Russ.).

8. Кузевская И.В., Горбатенко В.П., Носырева О.В., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е., Чурсин В.В., Чердыко Н.Н. Агроклиматические характеристики земель сельскохозяйственного назначения на территории Сибирского федерального округа в условиях изменения климата // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 10. С. 77–87.

Kuzhevskaya I.V., Gorbatenko V.P., Nosyрева O.V., Volkova M.A., Nepochurenko O.E., Chursin V.V., Chered'ko N.N. Agroclimatic Characteristics of Agricultural Land in the Siberian Federal District in Changing Climate. *Meteorologiya i gidrologiya* = *Russian Meteorology and Hydrology*, 2023, no. 10, pp. 77–87. <https://doi.org/10.3103/S1068373923100072>

9. Куликов М.И. Шелкопрядники таежной зоны Западной Сибири и особенности их лесовозобновительного процесса: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Свердловск, 1966. 26 с.

Kulikov M.I. *Forests Damaged by Siberian Moth of the Taiga Zone of Western Siberia and the Features of their Restoration Process: Cand. Agr. Sci. Diss. Abs.* Sverdlovsk, 1966. 26 p. (In Russ.).

10. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Venetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risks for Forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 259, iss. 4, pp. 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>

11. Born W., Rauschmayer F., Bräuer I. Economic Evaluation of Biological Invasions – a Survey. *Ecological Economics*, 2005, vol. 55, iss. 3, pp. 321–336. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.08.014>

12. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, iss. 6160, pp. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

13. Kenis M., Auger-Rozenberg M.-A., Roques A., Timms L., Péré C., Cock M.J.W., Settele J., Augustin S., Lopez-Vaamonde C. Ecological Effects of Invasive Alien Insects. *Eco-*

logical Impacts of Non-Native Invertebrates and Fungi on Terrestrial Ecosystems. Dordrecht, Springer, 2008, pp. 21–45. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9680-8_3

14. Kharuk V.I., Im S.T., Oskorbin P.A., Petrov I.A., Ranson K.J. Siberian Pine Decline and Mortality in Southern Siberian Mountains. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 310, pp. 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.042>

15. Logan J.A., Régnière J., Powell J.A. Assessing the Impacts of Global Warming on Forest Pest Dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, vol. 1, iss. 3, pp. 130–137. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0130:ATIOGW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0130:ATIOGW]2.0.CO;2)

16. Martínez-Vilalta J., Lloret F., Breshears D.D. Drought-Induced Forest Decline: Causes, Scope and Implications. *Biology Letters*, 2012, vol. 8, iss. 5, pp. 689–691. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.1059>

17. Raffa K.F., Aukema B.H., Bentz B.J., Carroll A.L., Hicke J.A., Turner M.G., Romme W.H. Cross-Scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. *Bioscience*, 2008, vol. 58, iss. 6, pp. 501–517. <https://doi.org/10.1641/B580607>

18. Raiyani K., Gonçalves T., Rato L., Salgueiro P., Marques da Silva J.R. Sentinel-2 Image Scene Classification: A Comparison between Sen2Cor and a Machine Learning Approach. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 2, art. no. 300. <https://doi.org/10.3390/rs13020300>

19. Rinn F. *TSAP V3.5. Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation*. Heidelberg, Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.

20. Worrall J.J., Marchetti S.B., Egeland L., Mask R.A., Eager T., Howell B. Effects and Etiology of Sudden Aspen Decline in Southwestern Colorado, USA. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 260, iss. 5, pp. 638–648. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.05.020>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630.425:581.192

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-91-109

Загрязнение хвои ели европейской (*Picea abies* (L.) Н. Karst.) тяжелыми металлами в условиях техногенных выбросов

Г.В. Калько¹✉, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [E-6379-2015](https://orcid.org/0000-0003-2664-9820),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2664-9820>

А.Е. Андреев², аспирант; ResearcherID: [P-8217-2016](https://orcid.org/0000-0003-3343-2937),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3343-2937>

¹Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, просп. Институтский, д. 21, Санкт-Петербург, Россия, 194021; gkalko@spb-niilh.ru✉

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; alexander_597@mail.ru

Поступила в редакцию 01.12.23 / Одобрена после рецензирования 26.02.24 / Принята к печати 28.02.24

Аннотация. Рассмотрен элементный состав хвои ели европейской в ельниках с разной степенью загрязнения тяжелыми металлами на Северо-Западе России. Целью работы была оценка содержания Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Pb, Cd и Cr и их парных корреляций в хвое ели европейской в насаждениях, расположенных на расстоянии 5–31 км от предприятий металлургии и теплоэнергетики и вблизи дорог с разной интенсивностью движения. Сбор образцов и определение количества элементов в хвое проводили с использованием стандартных методик. Анализ данных осуществляли с применением языка программирования Python 3.8. Сравнение выполняли непараметрическими методами. Загрязненность пробных площадей характеризовали с помощью коэффициентов концентрации элементов в хвое, соответствующих распространенному в зарубежной литературе показателю Contamination Factor (CF), и суммарного показателя загрязнения. Средний уровень загрязнения был выявлен на участках в 5 и 12 км от металлургического предприятия в г. Гатчине Ленинградской области и в 25 км от Череповецкой государственной районной электрической станции (в 50 км от г. Череповца) в Вологодской области. Низкий уровень загрязнения отмечен вблизи автотрасс в Любанском лесничестве Ленинградской области, в 5 и 12 км от Череповецкой государственной районной электрической станции. Элементный состав хвои на всех объектах характеризовался несколько более низким содержанием Cu, Ni, Mn и Zn и значительно превосходящим количеством Pb, Cd и Cr, чем в фоновых насаждениях северной Европы. На ближайшем к г. Гатчине участке выявлен дефицит Mn у елей 1-го яруса и подроста. Обнаружены достоверные коэффициенты корреляции Спирмена для медиан содержания в хвое Cu и Cr ($r = 0,89$, Гатчинское лесничество), Pb и Cd ($r = 0,83$, Кадуйское лесничество), Ni и Cd, а также Ni и Pb ($r = 0,89$ и $r = -0,88$ вблизи автодорог в Любанском лесничестве). Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования методологии экологического мониторинга территорий с использованием ели в качестве биоиндикатора.

Ключевые слова: *Picea abies* (L.) Н. Karst., хвоя, техногенное загрязнение, содержание, коэффициент концентрации, тяжелые металлы, корреляция

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств федерального бюджета в рамках госзадания ФБУ «СПбНИИЛХ» (№ 053-0006-22-00).

Для цитирования: Калько Г.В., Андреев А.Е. Загрязнение хвои ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) тяжелыми металлами в условиях техногенных выбросов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 91–109. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-91-109>

Original article

Contamination of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) Needles with Heavy Metals under Conditions of Technogenic Emissions

Galina V. Kalko¹✉, Candidate of Biology; ResearcherID: [E-6379-2015](https://orcid.org/0000-0003-2664-9820),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2664-9820>

Alexander E. Andreev², Postgraduate Student; ResearcherID: [P-8217-2016](https://orcid.org/0000-0003-3343-2937),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3343-2937>

¹Saint Petersburg Forestry Research Institute, prosp. Institutsky, 21, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; gkalko@spb-niilh.ru✉

²Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, per. Institutsky, 5, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation; alexander_597@mail.ru

Received on December 1, 2023 / Approved after reviewing on February 26, 2024 / Accepted on February 28, 2024

Abstract. The elemental composition of Norway spruce needles in spruce forests with varying degrees of heavy metal contamination in the North-West of Russia has been considered. The aim of the research has been to evaluate the content of Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Pb, Cd and Cr and their pair correlations in the needles of Norway spruce trees in stands located at a distance of 5–31 km from metallurgical enterprises and thermal power plants and near roads with different traffic intensity. Sample collection and determination of the amount of elements in the needles have been carried out using standard techniques. Data analysis has been performed using the Python 3.8 programming language. The comparison has been performed using nonparametric methods. The contamination of the sample plots has been characterized using the coefficients of concentration, the same as Contamination Factor (CF), of elements in the needles and the total indicator of contamination. The average level of pollution has been detected at sites 5 and 12 km from the metallurgical enterprise in the city of Gatchina, the Leningrad Region, and 25 km from the Cherepovets State District Electric Power Station (50 km from the city of Cherepovets), the Vologda Region. Low levels of pollution have been noted near highways in the Luybansky Forestry of the Leningrad Region, 5 and 12 km from the Cherepovets State District Electric Power Station. The elemental composition of the needles at all sites has been characterized by a slightly lower content of Cu, Ni, Mn, and Zn and a significantly higher amount of Pb, Cd, and Cr than in the background stands of Northern Europe. In the area closest to the city of Gatchina, a Mn deficiency has been detected in fir trees of the 1st layer and undergrowth. Reliable Spearman correlation coefficients have been found for the median content of Cu and Cr ($r = 0.89$, the Gatchina Forestry), Pb and Cd ($r = 0.83$, the Kaduy Forestry), Ni and Cd, as well as Ni and Pb ($r = 0.89$ and $r = -0.88$ near highways in the Lyubansky Forestry) in the needles. The results of the research can be used to improve the methodology for environmental monitoring of territories using spruce as a bioindicator.

Keywords: *Picea abies* (L.) H. Karst., needles, technogenic pollution, content, coefficient of concentration, heavy metals, correlation

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of the federal budget within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution “Saint Petersburg Forestry Research Institute” (no. 053-0006-22-00).

For citation: Kalko G.V., Andreev A.E. Contamination of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) Needles with Heavy Metals under Conditions of Technogenic Emissions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 91–109. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-91-109>

Введение

В последние десятилетия достигнуты значительные успехи в понимании функционирования биогеохимических циклов элементов в биосфере. Вместе с тем общепризнано, что наши знания об экологической роли и поведении следовых элементов в живых организмах недостаточны [4, 12, 29]. Актуальность исследования заключается в получении информации о содержании тяжелых металлов (ТМ) в хвое ели европейской в лесах вблизи источников техногенного загрязнения на Северо-Западе России.

По данным ряда авторов доля большинства локально осаждающихся ТМ лежит в пределах 15–50 % от количества выбросов [12]. По альтернативному мнению, перенос ТМ от источников техногенного загрязнения на Кольском полуострове (никелевые, обжиговые и нефтеперерабатывающие заводы в пос. Никеле, г. Заполярном и г. Мончегорске, Россия) на значительные расстояния не представляет глобальной экологической проблемы в связи с тем, что превосходящая часть ТМ осаждается вблизи источников и опасна в региональном масштабе [37].

Большой объем данных о распределении ТМ в почвах был получен при изучении западной части Кольского полуострова и соседних районов Финляндии и Норвегии (1992–1995 гг., www.ngu.no/Kola), Северной Европы (2000–2001 гг., www.gsf.fi/Barents), 33 стран Европы (2009–2014 гг., сельскохозяйственные и пастбищные почвы, <http://gemas.geolba.ac.at/>). Естественная изменчивость концентраций ТМ в почвах Европы охватывает несколько порядков. Выявлена в среднем 6-кратная и выше разница в медианном содержании элементов (http://gemas.geolba.ac.at/image/GEMAS_Brochure.pdf). Показано, что распределение элементов зависит от геологии и климата. Высокий уровень микроэлементов в почвах чаще всего связан с месторождениями и разработкой полезных ископаемых.

Прямой корреляции между содержанием ТМ в растениях и их валовой концентрацией в почве обычно не обнаруживают из-за способности растений к избирательному накоплению элементов [3, 24, 40]. Однако в литературе есть данные и о тесной связи между концентрацией поллютантов в хвое деревьев и их уровнем в генетических горизонтах почвенного профиля [11]. Элементы поглощаются растениями не в эквивалентных по отношению к их содержанию в почве количествах [15]. Обмен элементами между растениями и почвой, на которой они произрастают, создает взаимный контроль их состава, при этом микроэлементный состав хвои ели и сосны адаптируется более значительно, чем состав гумуса под деревьями [33].

Чаще выявляют зависимость накопления ТМ растениями от содержания их подвижных свободных форм в почвенном растворе [4]. В башкирских черноземах импактная зона для валовых форм ТМ обнаружена в радиусе 1–5 км от источников загрязнения, для подвижных форм – до 10 км [21]. Показано, что содержание в почве подвижной формы ТМ динамично во времени: максимальные

величины могут превосходить минимальные в течение вегетационного сезона в 5 и более раз [3].

Внесен значительный вклад в изучение процессов деградации и гибели лесов вблизи источников интенсивного промышленного загрязнения окружающей среды ТМ в аспектах изучения почв, состояния насаждений и содержания элементов в листьях растений [8, 13, 19, 20, 38, 39]. Отмечено, что при техногенной дигрессии лесов в почве недостаточно важнейших для обеспечения жизни растений минеральных элементов – Ca, Mg, Mn, Zn, K, P. При снижении в течение нескольких лет уровня промышленных выбросов устойчивой тенденции к улучшению состояния почв не наблюдается [16]. Локальное антропогенное загрязнение влияет на концентрации элементов в листьях растений на расстоянии около 20 км от источника [31, 36]. За местные фоновые принимают условно чистые насаждения того же вида и типа леса, расположенные в 30 км от источников загрязнения [6]. На стадиях затухающей дефолиации в техногенных редколесьях вблизи медно-никелевого комбината «Североникель» выявляется снижение концентраций Ca, Mg, Mn и Zn и возрастание содержания K в хвое [8, 17]. Тем не менее, полного понимания роли влияния загрязнений ТМ на физиологию и генетическую стабильность деревьев не достигнуто.

Виды растений по-разному поглощают химические элементы [28, 38, 40]. А.Л.М. Baker [24] предложил подразделять растения по накоплению ТМ на 3 категории: исключатели, аккумуляторы и индикаторы.

Показано, что органы растений способны накапливать разное количество элементов. Так, древесина березы и ели значительно обогащается некоторыми ТМ (например, Cd) за счет подстилающих почв, без какого-либо антропогенного воздействия. Предполагают, что аккумулярование Cd в древесине может быть связано с историей загрязнения территорий [41]. Также не наблюдалось корреляции между уровнями загрязнения почв и содержанием металлов в годичных кольцах древесины сосны и березы [27].

В связи с тем, что большая часть поллютантов попадает в экосистемы, находящиеся на расстоянии до нескольких десятков километров от промышленных предприятий [31, 36], представляет интерес изучение содержания ТМ в ассимилирующих органах лесобразующих пород в насаждениях, расположенных в 5–30 км от локальных источников техногенного загрязнения различного происхождения.

Целью работы была оценка количества Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Pb, Cd и Cr в хвое ели европейской в насаждениях, расположенных на расстоянии 5–31 км от стационарных источников антропогенного загрязнения различного профиля и вблизи автотрасс на Северо-Западе России, обнаружение парных корреляций содержания ТМ в хвое на изучаемых участках леса.

Объекты и методы исследования

Места отбора проб хвои ели вблизи стационарных источников загрязнений выбраны в одном азимутальном направлении с учетом розы ветров. Принимали во внимание наличие ельников зеленомошных, расположенных в створе одной прямой на разном расстоянии от предприятий. В Гатчинском лесничестве Ленинградской области опытные участки

лежат перпендикулярно преобладающей розе ветров, пробные площади расположены в 5 (Гатчина1), 12 (Гатчина2) и 31 (Гатчина3, контроль) км от металлургического завода ООО «Орион-Спецсплав-Гатчина» в ельниках кисличных. В Кадуйском лесничестве Вологодской области опытные участки распределены соответственно преобладающим ветрам на расстоянии 5 (Кадуй1, контроль), 12 (Кадуй2) и 25 (Кадуй3) км от предприятия теплоэнергетики Череповецкой государственной районной электрической станции (ГРЭС) в ельниках черничных. Для оценки влияния загрязнений автотранспортом пробы брали в Любанском лесничестве Ленинградской области у федеральной автотрассы М10 (Тосно1), региональной дороги Тосно–Лисино-Корпус (Тосно2) и в насаждении на просеке (Тосно3, контроль) в ельниках кисличных.

На каждой пробной площади в июле 2020 и 2021 гг. отбирали образцы хвои с 5 господствующих деревьев (1–2-го класса по Крафту [7]), равномерно расположенных по учетному участку и с 5 елей подроста, растущих поблизости от крупных экземпляров ели. Прирост текущего года и 1-летний прирост замеряли в верхней части кроны с использованием общепринятых методик [10, 34]. Содержание ТМ: Mn, Zn, Cu, Fe, Pb, Cr, Ni, Cd – в хвое елей в смешанных образцах, полученных за 2 года (1:1 сухого веса, с. в.), определяли в ФБУ «Рослесозащита» в соответствии с нормативным документом Федеральной службы по надзору в сфере природопользования ПНД Ф 16.2.2:2.3.71–2011 [9]. Пробы хвои высушивали при 60 °С, размалывали на лабораторной мельнице и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Навеску массой 0,2 г минерализовали с помощью системы микроволнового разложения проб (MARS) в присутствии 10 мл концентрированной азотной кислоты. Получившийся после разложения минерализат переносили в мерные колбы вместимостью 50 мл, доводили до метки дистиллированной водой и перемешивали.

Элементы определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 (производство Shimadzu).

Коэффициент концентрации (отношение содержания химического элемента в оцениваемом объекте к фоновому содержанию этого элемента) каждого элемента вычисляли по формуле [15]

$$K_c = \frac{C}{C_b},$$

где C , C_b – медиана содержания элемента в хвое на опытной пробной площади и в фоновых насаждениях соответственно.

В связи с необходимостью расчета коэффициентов концентрации количество необнаруживаемых элементов принимали за 50 % от нижних пределов количественного определения – для Ni, Pb, Cr 0,05 мг/кг с. в. и для Cd 0,0025 мг/кг с. в. Аналогичное допущение было принято С. Reimann et al. [38] при вычислении отношений медиан содержания ТМ в листьях разных видов растений.

За фоновое содержание принимали медиану содержания ТМ в фоновых насаждениях ели (5 российских, 2 финских и 1 норвежское) Северной Европы [39]. Нами была выбрана эта региональная оценка фоновой загрязненности хвои ели ТМ в связи с относительной однородностью геохимического

фона молодых, образовавшихся после таяния ледников, почв северной Европы (<http://gemas.geolba.ac.at/>).

Суммарный показатель загрязнения рассчитывали по формуле [15]

$$Z_c = \sum_1^n K_c - (n - 1),$$

где n – число элементов.

При расчете Z_c принимали во внимание элементы, у которых коэффициент концентрации больше 1. Использовали шкалу уровней загрязнения Ю.Е. Сает и соавторов: 8–16 – низкий, 16–32 – средний, 32–128 – высокий, > 128 – очень высокий [15].

Статистический анализ данных осуществляли при помощи языка программирования Python версии 3.8. Обработка входных данных выполнялась посредством библиотеки pandas (v.1.2.1) [35]. Графики строили при помощи библиотеки matplotlib (v.3.3.3) [22]. Проверку наличия статистически достоверных различий в содержаниях ТМ проводили отдельно по локациям сбора хвои у подроста и доминантных деревьев 1-го яруса. Сравнение осуществляли непараметрическими методами посредством критерия Краскела–Уоллиса, библиотека scipy (v.1.10.0) [45]. Фактором сравнения являлся номер пробной площади. Уровень статистической достоверности был принят равным 0,05. При обнаружении различий проводились post-hoc тесты в виде попарных сравнений с применением критерия Манна–Уитни с поправкой на множественное сравнение Сидака, библиотека scikit_posthocs (v.0.6.7) [43]. Корреляции между группами оценивали по уровню содержания металлов в хвое методом корреляционного анализа Спирмена (библиотека scipy).

Результаты исследования и их обсуждение

Содержания ТМ в листьях растений варьируют в широких пределах в зависимости от вида, генотипа, органа, ткани и условий роста [28, 32]. По классификации А.Л.М. Baker [24] ель европейская является исключителем Cu, Fe, Ni, Pb, Cd и Cr и аккумулятором Mn и Zn. Это показано на основе данных по содержанию ТМ в горизонтах почвы O и C и в ассимилирующих органах на материале выборок 6 российских, 2 финских и 1 норвежского насаждения ели европейской [38]. На индустриальных территориях происходит индивидуальная для каждого вида модификация накопления ТМ [24]. Атмосферное загрязнение сопровождается аккумулярованием Ni, Cu, Pb и Cd в ассимилирующих и многолетних органах ели и их обеднением N, Ca, Mg, Mn и Zn [5, 18].

На рис. 1–6 представлены распределения содержания ТМ в хвое елей в насаждениях, расположенных на разных расстояниях от металлургического завода, предприятия теплоэнергетики и вблизи автодорог. Основной блок диаграммы – «ящик» – показывает интервал между 1-м и 4-м квартилями, который охватывает 50 % данных. Внутри ящика находится горизонтальная линия, являющаяся медианой данных распределения. Диапазон остальной части содержаний ТМ определяется «усами», выходящими за пределы диаграммы. Точки за границей усов – выпадающие значения, сильно отличающиеся от основного распределения.

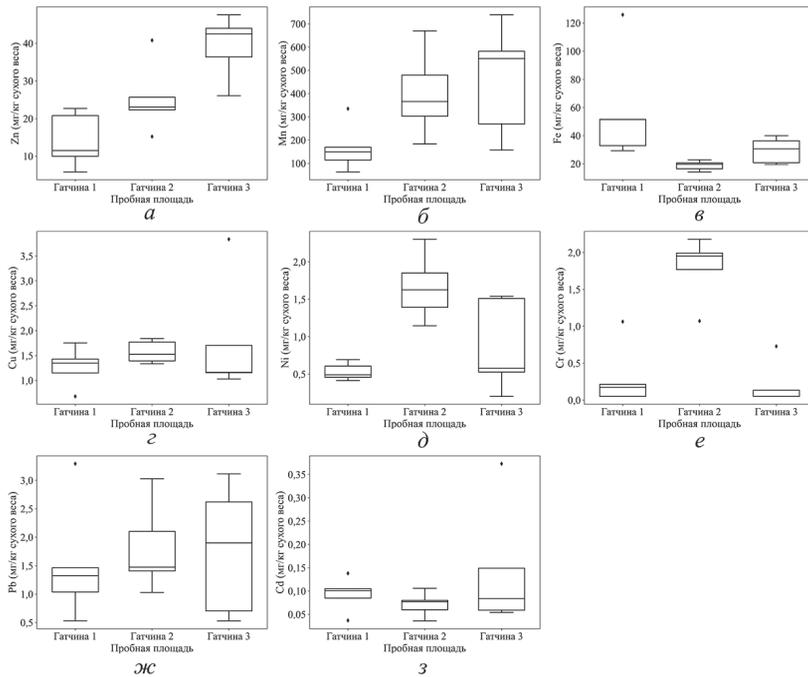


Рис. 1. Содержание металлов в хвое елей 1-го яруса вблизи металлургического завода в г. Гатчине: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

Fig. 1. The content of metals in the needles of spruce trees of the 1st layer near the metallurgical plant in the city of Gatchina: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

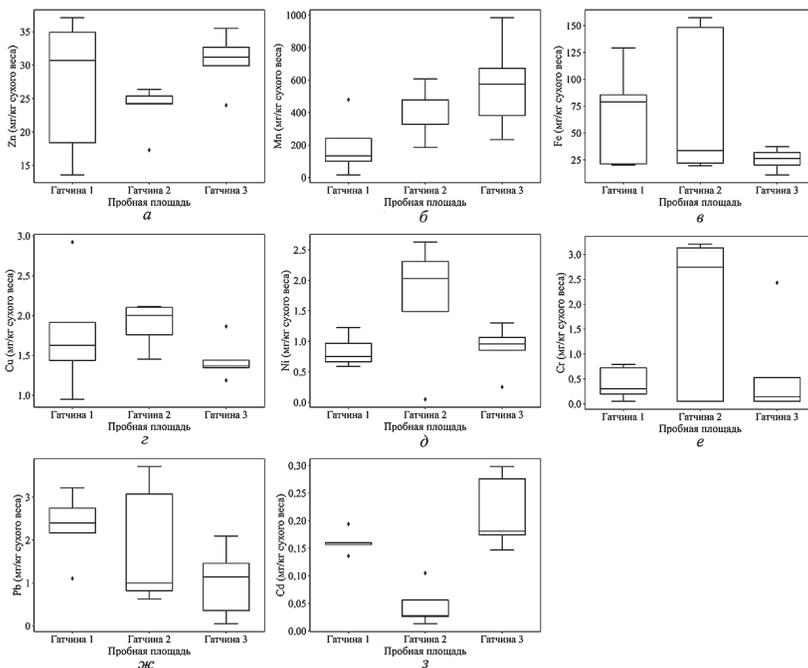


Рис. 2. Содержание металлов в хвое подроста ели вблизи металлургического завода в г. Гатчине: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

Fig. 2. The content of metals in the needles of spruce undergrowth near the metallurgical plant in the city of Gatchina: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

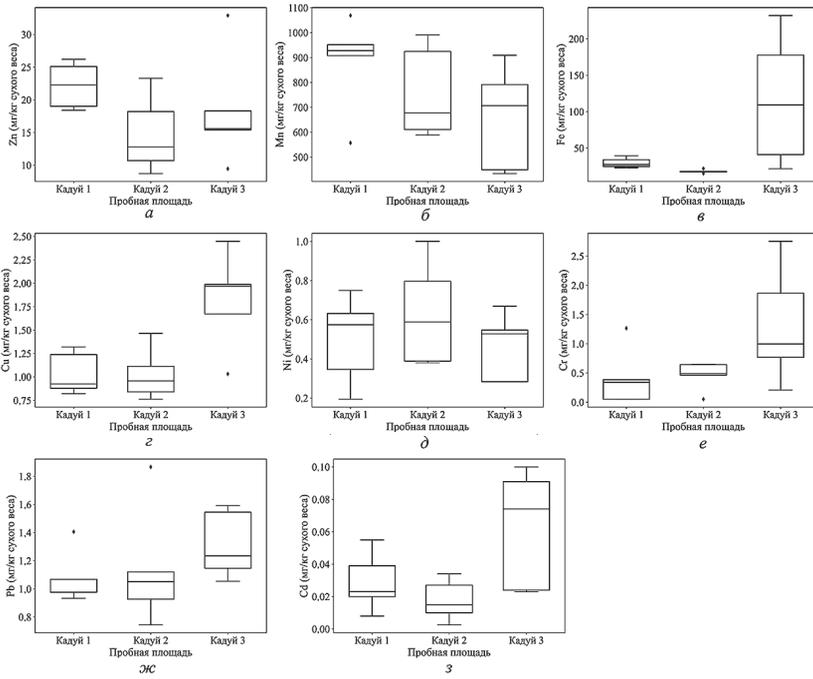


Рис. 3. Содержание металлов в хвое елей 1-го яруса вблизи Череповецкой ГРЭС: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

Fig. 3. The content of metals in the needles of spruce trees of the 1st layer near the Cherepovets State District Electric Power Station: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

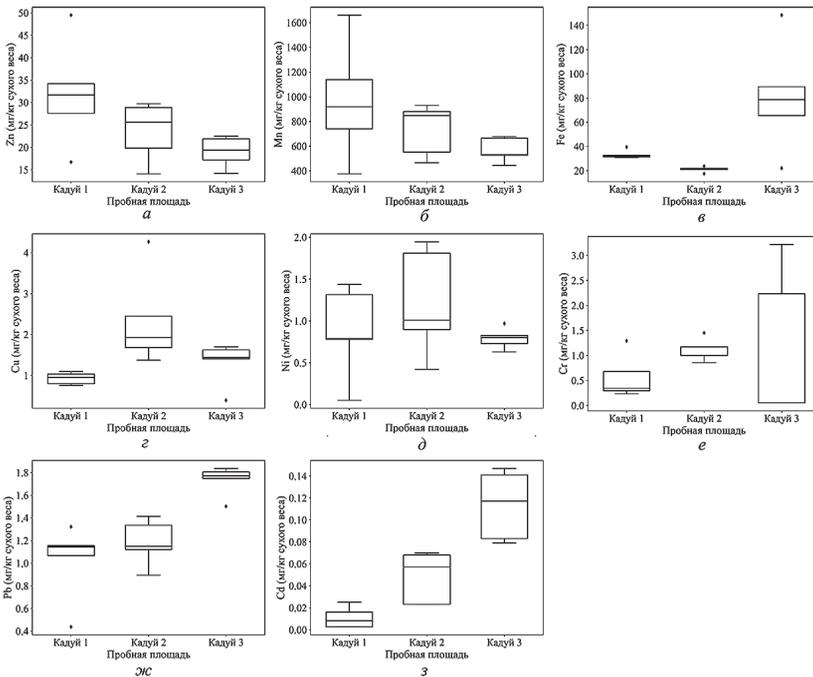


Рис. 4. Содержание металлов в хвое подроста ели вблизи Череповецкой ГРЭС: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

Fig. 4. The content of metals in the needles of spruce undergrowth near the Cherepovets State District Electric Power Station: а – Zn; б – Mn; в – Fe; г – Cu; д – Ni; е – Cr; ж – Pb; з – Cd

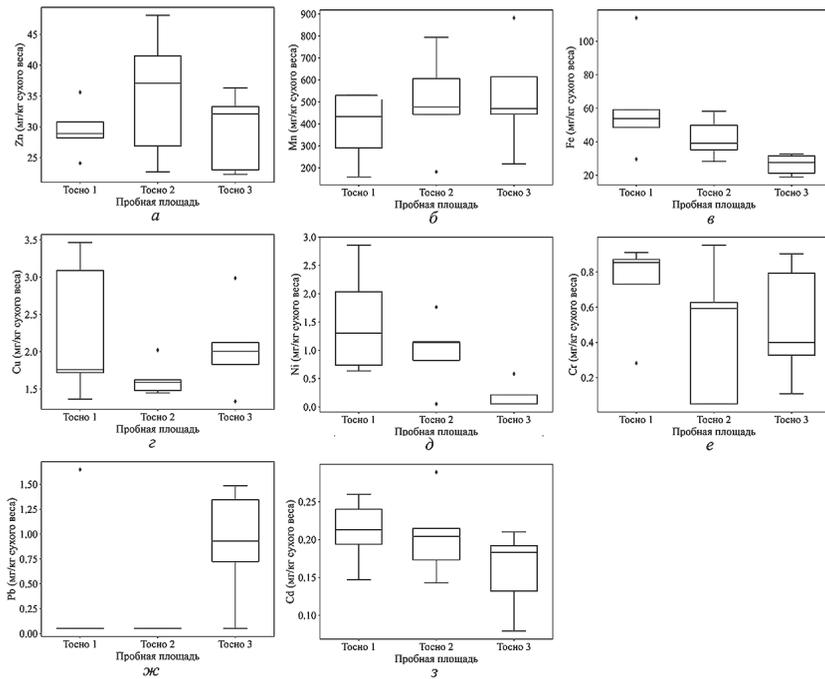


Рис. 5. Содержание металлов в хвое елей 1-го яруса вблизи автотрасс в Ленинградской области: *a* – Zn; *б* – Mn; *в* – Fe; *г* – Cu; *д* – Ni; *е* – Cr; *ж* – Pb; *з* – Cd

Fig. 5. The content of metals in the needles of spruce trees of the 1st layer near highways in the Leningrad Region: *a* – Zn; *б* – Mn; *в* – Fe; *г* – Cu; *д* – Ni; *е* – Cr; *ж* – Pb; *з* – Cd

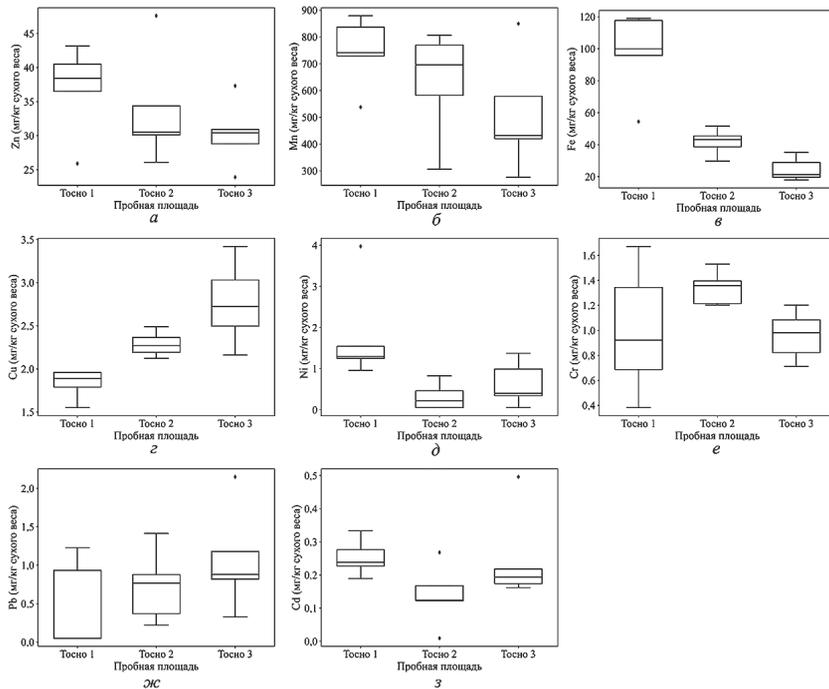


Рис. 6. Содержание металлов в хвое подроста ели вблизи автотрасс в Ленинградской области: *a* – Zn; *б* – Mn; *в* – Fe; *г* – Cu; *д* – Ni; *е* – Cr; *ж* – Pb; *з* – Cd

Fig. 6. The content of metals in the needles of spruce undergrowth near highways in the Leningrad Region: *a* – Zn; *б* – Mn; *в* – Fe; *г* – Cu; *д* – Ni; *е* – Cr; *ж* – Pb; *з* – Cd

Как видно из рис. 1–6, только в редких случаях распределение содержания элементов в хвое на пробных участках близко к нормальному. На некоторых пробных площадях отмечаются выбросы содержания ТМ. Широкий диапазон концентраций ТМ в хвое елей, ненормальное распределение данных и наличие выбросов отмечались и в исследованиях других авторов [38, 39, 44].

В таблице показаны коэффициенты концентрации элементов в хвое елей на изучаемых объектах и суммарный показатель загрязнения, рассчитанный на их основе. Для расчета K_c использовали медианы содержания элементов, т. к. в отличие от средних значений они не чувствительны к выбросам и характеру распределения данных и широко используются исследователями [38, 39, 44] для характеристики загрязненности тканей растений ТМ.

Попарные сравнения содержания металлов в хвое проводили между пробными площадями каждого объекта по отдельности. Контрольными первоначально считали площади, расположенные на расстоянии 25–31 км от источника загрязнения, аналогично тому, как это принимается в других исследованиях [6, 31, 36]. Тем не менее установлено, что в Кадуйском лесничестве пробная площадь Кадуй3, наиболее удаленная от Череповецкой ГРЭС, была самой загрязненной ($Z_c = 18,2$, средний уровень загрязненности). В связи с тем, что выбросы стационарных источников г. Череповца составляли в 2021 г. 74,55 %, а Кадуйского (0,61 %) и соседних (Белозерского – 0,86 %, Бабаевского – 0,77 %, Устюженского – 0,41 %, Череповецкого – 0,22 %) районов 2,87 % от общего количества поллютантов, попавших в атмосферу Вологодской области [2], можно утверждать, что пробная площадь Кадуй3 испытывала загрязняющее воздействие предприятий города. Контрольной являлась пробная площадь Кадуй1 с $Z_c = 8,6$.

В Гатчинском лесничестве наиболее удаленная от металлургического предприятия площадь Гатчина3 с $Z_c = 14,1$ стала контрольной. В Любанском лесничестве все пробные площади имели низкий уровень загрязненности ($Z_c < 16$), за контроль принимали пробную площадь Тосно3 с $Z_c = 14,1$.

Как видно из таблицы, элементный состав хвои ели на всех объектах характеризовался несколько более низкими содержаниями в хвое Cu, Ni, Mn и Zn и значительно превышающими фоновые по Северной Европе [39] концентрациями Pb, Cd и Cr. Возможно, эти различия связаны с особенностями геологии изучаемых территорий. Ежегодные выбросы стационарными источниками ТМ Pb, Cd и Cr колеблются в стране в течение последних 10 лет около 80, 7 и 90 т соответственно. Все пробные площади находятся в промышленно развитых регионах России, которые считают экологически благополучными [14].

Содержание Fe достоверно выше в хвое на пробной площади Гатчина1 ($Z_c = 17,35$) у крупных елей по сравнению с площадями Гатчина2 ($Z_c = 20,75$) и Кадуй3 ($Z_c = 18,2$); у крупных елей и подроста по сравнению с участками Кадуй2 ($Z_c = 11,4$) и Кадуй1 ($Z_c = 8,6$); а также достоверно выше на участке Тосно1 ($Z_c = 11,75$) у крупных елей в сопоставлении с площадью Тосно3 ($Z_c = 14,1$) и у подроста на участке Тосно1 сравнительно с участками Тосно2 ($Z_c = 11,55$) и Тосно3 ($Z_c = 14,1$). Концентрации данного элемента на исследованных территориях выше, чем на фоновых по северной Европе в 1,3–2,8 раза, чем для других площадей одноименных объектов – в 1,4–5,6 раза. Т.А. Сухарева и И.В. Лукина [18] связывали содержание Fe в хвое с уровнем атмосферных загрязнений и считали, что снижение в 2–4 раза уровня Fe в хвое ели и сосны в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях на Кольском полуострове обусловлено сокращением выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, произошедших между датами сбора образцов.

Коэффициенты концентрации для Zn, Mn, Fe, Pb, Cd, Cr, Ni и Cu в хвое елей и суммарный показатель загрязнения на пробных площадях Ленинградской и Вологодской областей
The concentration coefficient values for Zn, Mn, Fe, Pb, Cd, Cr, Ni and Cu in spruce needles and the total indicator of contamination in the sample plots of the Leningrad and Vologda Regions

Элемент	Гатчинское лесничество						Кадуйское лесничество						Любанское лесничество, дороги					
	Гатчина1		Гатчина2		Гатчина3		Кадуй1		Кадуй2		Кадуй3		Тосно1		Тосно2		Тосно3	
	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П	Д	П
Zn	0,3	0,7	0,6	0,6	1,0	0,8	0,8	0,5	0,8	0,3	0,6	0,4	0,4	0,7	0,9	0,7	0,8	0,7
Mn	0,2	0,2	0,5	0,6	0,7	0,7	1,2	1,1	0,8	1,1	0,9	0,7	0,7	0,5	0,9	0,6	0,9	0,6
Fe	1,3	2,0	0,5	0,9	0,8	0,7	0,7	0,8	0,5	0,5	2,8	2,0	1,4	2,6	1,0	1,1	0,7	0,5
Pb	9,4	17,1	10,5	7,1	13,6	8,1	7,6	8,2	7,5	8,2	8,8	12,7	0,4*	0,4*	0,4**	5,5	6,6	6,3
Cd	3,3	5,1	2,5	0,9	2,7	5,8	0,7	0,3	0,5	1,8	2,4	3,8	6,9	7,7	6,6	4,0	5,9	6,2
Cr	0,9	1,5	9,8	13,7	0,3**	0,7	1,7	1,7	2,5	5,8	5,0	4,9	4,3	4,6	3,0	6,8	2,0	4,9
Ni	0,4	0,6	1,3	1,6	0,4	0,7	0,4	0,6	0,5	0,8	0,4	0,6	1,0	1,0	0,9	0,2	0,1	0,3
Cu	0,6	0,8	0,7	1,0	0,6	0,7	0,4	0,5	0,5	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8	1,1	1,0	1,3
Z _{сдп} Z _{спп}	12,0	22,7	21,1	20,4	15,3	12,9	8,3	8,9	9,0	13,8	16,0	20,4	10,6	12,9	8,6	14,5	12,5	15,7
Z _c	17,35		20,75		14,1		8,6		11,4		18,2		11,75		11,55		14,1	

Примечание: * У 3–4 из 5 учетных деревьев концентрация Pb в хвое находится ниже предела количественного определения. ** У всех учетных деревьев концентрация Pb в хвое ниже предела количественного определения. Д – деревья ели европейской 1-го яруса; П – подрост ели европейской; Z_{сдп}, Z_{спп}, Z_c – суммарное загрязнение крупных деревьев, подроста и всех особей ели европейской на пробной площади.

Пониженные концентрации Zn и Mn в хвое елей в загрязненных зонах в разных регионах Европы выявляли многие авторы [5, 18, 38, 39]. Как видно из таблицы, на объектах в Гатчинском и Кадуйском лесничествах прослеживалась тенденция увеличения коэффициентов концентрации для Mn в хвое по мере удаления от наиболее загрязненных участков Гатчина1 ($Z_c = 17,35$) и Кадуй3 ($Z_c = 18,2$). Достоверные отличия в медианах содержаний 2 элементов в хвое установлены только для крупных елей под Гатчиной: количество Mn в хвое существенно меньше у елей на площади Гатчина1 ($Z_c = 17,35$), чем на другом средне загрязненном участке Гатчина2 ($Z_c = 20,75$). Медианы содержания Mn в хвое елей на пробной площади Гатчина1 (149,5 и 132,8 мг/кг с. в. у крупных елей и подроста соответственно) свидетельствуют о дефиците этого элемента. Недостаточным для хвои ели считают уровень < 200 мг/кг с. в. [18]. Содержание Zn в хвое крупных деревьев достоверно меньше на этой площади, чем на участке Гатчина3 ($Z_c = 14,1$): медианы содержания Zn составили 11,5 и 42,5 мг/кг с. в. соответственно. Ели с концентрацией Zn < 13 мг/кг с. в. хвои испытывают дефицит этого элемента [30].

Кроме участка Гатчина1 ($Z_c = 17,35$), для которого показаны повышенные в 1,6–2,9 раза по сравнению с другими площадями в Гатчинском лесничестве концентрации Fe, дефицитные у крупных елей и подроста концентрации Mn и пониженные у елей 1-го яруса и дефицитные у подроста концентрации Zn в хвое, выделяется площадь Гатчина2 ($Z_c = 20,75$). На этом участке выявлены достоверно более высокие, чем на площади Гатчина1, концентрации Ni (в 3,3 и 2,7 раза у деревьев 1-го яруса и подроста соответственно) и Cr (в 11,3 и 9,1 раза у крупных деревьев и подроста соответственно). Концентрация Cd в хвое подроста на участке Гатчина2, напротив, достоверно ниже, чем на площадях Гатчина1 и Гатчина3, и соответствовала фоновой по северной Европе: 0,157, 0,028 и 0,181 мг/кг с. в. на участках Гатчина1, Гатчина2 и Гатчина3 ($Z_c = 14,1$) соответственно.

В Кадуйском лесничестве на средне загрязненной площади Кадуй3 ($Z_c = 18,2$) кроме повышенного в 2,5–5,6 раза по сравнению с другими участками уровня Fe в хвое крупных елей и подроста зафиксированы достоверно более высокие, практически на уровне фоновых по Северной Европе ($K_c = 0,9$), концентрации Cu в хвое крупных елей в сопоставлении с площадью Кадуй1 ($Z_c = 8,6$) и Кадуй2 ($Z_c = 11,4$). Медианы содержания Cu у елей 1-го яруса составляли 1,97, 0,92 и 0,95 мг/кг с. в., на площадях Кадуй3, Кадуй1 и Кадуй2 соответственно. У подроста концентрации Cu существенно выше на площади Кадуй3 ($Z_c = 18,2$), чем на участке Кадуй1 ($Z_c = 8,6$). Отмечены существенно более высокие концентрации Pb и Cd в хвое подроста на загрязненной площади Кадуй3 по сравнению с участками Кадуй1 и Кадуй2.

На повышенное загрязнение площади Кадуй2 ($Z_c = 11,4$) указывают достоверно более высокие по сравнению с площадью Кадуй1 ($Z_c = 8,6$) концентрации в хвое подроста Cd (в 7,1 раза) и Cu (в 2,0 раза), а также сниженные до дефицитных (12,8 мг/кг с. в.) содержания Zn в хвое господствующих деревьев.

На участке Тосно1 ($Z_c = 11,75$) в Любанском лесничестве кроме достоверно более высокого (в 1,4–5,2 раза по сравнению с другими площадями) содержания Fe в хвое крупных елей и подроста выявлено существенное превышение концентраций Ni в хвое доминирующих елей по сравнению с площадью Тосно3 ($Z_c = 14,1$) и в хвое подроста по сравнению с участком Тосно2 ($Z_c = 11,55$). На площади Тосно3 ($Z_c = 14,1$) содержание Cu в хвое подроста достоверно выше,

чем на площади Тосно1, и находится на уровне североευропейского фонового [39]. Существенной разницы в количестве Zn и Mn в хвое елей на пробных площадях в Любанском лесничестве не обнаружено, тенденции изменения содержания этих элементов в хвое разнонаправленные у крупных елей и подроста.

Загрязнение крупных деревьев и подроста Pb на участке Тосно1 ($Z_c = 11,75$) было неравномерным. В хвое 3–4 из 5 учитываемых деревьев каждого возраста содержание оказалось ниже предела определения. Медиана количества этого элемента у деревьев 1-го яруса и подроста составила 0,05 мг/кг с. в. При этом средние концентрации Pb на площади Тосно1 (0,33 и 0,43 мг/кг с. в. в хвое крупных елей и подроста соответственно) близки к его среднему содержанию (0,41 мг/кг с. в.) в хвое в фоновых ельниках черничных в Северо-Двинском регионе [19] и превышали медиану для североευропейских фоновых насаждений ели [39] в 2,4 и 3,1 раза соответственно. Коэффициент концентрации Pb на других пробных площадях этого объекта варьировал в интервале 5,5–6,6. Медианы содержания Pb на пробных площадях вблизи металлургического предприятия в г. Гатчине превышали фоновые по северной Европе в 7,1–17,1 раза, вблизи Череповецкой ГРЭС – в 7,5–12,7 раза.

Аналогичные данные получили чешские ученые, заключившие, что вклад выбросов Pb, связанных с дорожным движением, не является существенным для Чешской Республики [42].

По нашим данным, в Гатчинском лесничестве на фоне достоверных различий содержания ТМ в хвое отмечены тенденции снижения генетического разнообразия (ожидаемой гетерозиготности), а также числа эффективных аллелей и индекса Шеннона на участках Гатчина1 ($Z_c = 17,35$) и Гатчина2 ($Z_c = 20,75$) по сравнению с Гатчина3 ($Z_c = 14,1$). На пробных площадях Любанского лесничества таких тенденций не выявлено [1].

На основе полученных данных можно заключить, что импактные участки Гатчина1 ($Z_c = 17,35$), Гатчина2 ($Z_c = 20,75$) и Кадуй3 ($Z_c = 18,2$) находились под влиянием Санкт-Петербургской и Череповецкой агломераций. Состав ТМ с коэффициентом концентрации >1 на разных площадях варьировал.

Взаимодействие между ТМ в тканях чаще рассматривалось при их поглощении и переносе по растению. В самих растениях в связи со сложностью метаболизма внутри клеток [23, 25, 26] наблюдавшиеся отношения между микроэлементами могли быть то антагонистическими, то синергическими. Наибольшее число антагонистических реакций выявлено для Fe, Mn, Cu, и Zn. Их антагонистами часто называли Cr, Mo и Se [4].

Накопление разных элементов в листьях растений взаимозависимо и может модулироваться условиями окружающей среды [17, 24, 44]. При рассмотрении попарных корреляций медиан содержания ТМ в хвое на 3 изучаемых объектах выявлены единичные и разные взаимосвязи в накоплении металлов в хвое. Показана достоверная положительная корреляция концентраций Cu и Cr в хвое елей (коэффициент корреляции Спирмена $r = 0,89$) вблизи металлургического предприятия в г. Гатчине. Положительная, но не достоверная связь между содержаниями этих элементов прослеживалась и на других объектах ($r = 0,60$ и в Любанском, и в Кадуйском лесничествах). Это противоречит сведениям об антагонизме Cr по отношению к Cu [4].

Установлена положительная взаимосвязь накопления Cd и Pb ($r = 0,83$) в хвое елей на пробных площадях вблизи Череповецкой ГРЭС.

Достоверная отрицательная корреляция концентраций Ni и Pb ($r = -0,88$) и положительная связь содержания Ni и Cd ($r = 0,89$) в хвое елей отмечены вблизи автодорог в Любанском лесничестве.

Польские авторы [4] считают, что синергизм Cd с металлами Pb, Fe и Ni может быть артефактом, возникающим вследствие стресса, вызванного поллютантами. То есть наличие положительных связей накопления Cd и Ni ($r = 0,89$) и Cd и Pb ($r = 0,83$) в хвое елей на пробных площадях Любанского и Кадуйского лесничеств также, вероятно, является косвенным показателем негативного антропогенного влияния на ельники.

Не выявлено достоверной положительной взаимосвязи между концентрациями Fe и Pb в хвое, характерной для окрестностей предприятий черной металлургии в Австрии в 2000-х гг. ($r = 0,97$). Авторы предположили, что накопление этих элементов может быть связано и с налипанием твердых частиц на поверхность хвои [44]. Наиболее сильная, но статистически недостоверная корреляция между этими ТМ показана на участке Кадуй3 ($Z_c = 18,2$, $r = 0,77$).

При поиске парных связей накопления элементов Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Pb, Cd и Cr в хвое разновозрастных елей на всех изучаемых объектах Ленинградской и Вологодской областей для господствующих елей достоверных парных корреляций в накоплении ТМ не выявлено. Коэффициенты корреляции варьировали от $-0,62$ до $0,55$. Обнаружена достоверная положительная взаимосвязь содержания Cu и Cr ($r = 0,77$) в хвое подроста.

Заключение

Оценена загрязненность пробных участков ельников, расположенных на расстояниях от 5 до 31 км от промышленных предприятий приблизительно по одному азимуту в Ленинградской и Вологодской областях и недалеко от источников загрязнения автотранспортом в Любанском лесничестве Ленинградской области. Средний уровень загрязнения, вычисленный на основе коэффициентов концентрации в хвое ели Fe, Pb, Cd, Cr, Ni и Cu (при коэффициенте $> 1,0$) был выявлен на пробных площадях, расположенных в 5 и 12 км от металлургического предприятия в г. Гатчине, и на участке в 25 км от Череповецкой государственной районной электрической станции (50 км от г. Череповца). Пробные площади около автотрасс загрязнены слабо.

Негативное воздействие загрязнения проявлялось и в снижении концентраций Mn и Zn в хвое у взрослых и молодых деревьев ели до дефицитных: Mn – у крупных елей и подроста; Zn – у елей 1-го яруса.

На подверженных влиянию техногенных объектов площадях недалеко от г. Гатчины и в Вологодской области, а также на участке вблизи федеральной трассы в Ленинградской области отмечено превышение фоновых североευропейских концентраций Fe в хвое в 1,3–2,8 раза.

На большей части обследованных участков выявлены превышения фоновых концентраций Cr в хвое в 1,5–13,7 раза, Pb – в 5,5–17,1 раза, Cd – в 1,8–7,7 раза. Это может быть связано с уменьшенными по сравнению с уровнем 1990-х годов, но продолжающимися антропогенными выбросами этих элементов на территории Северо-Запада России или с тем, что поллютанты, поступившие в экосистемы в предыдущие годы, выводятся из них крайне медленно.

Обнаруженные парные корреляции медиан содержания тяжелых металлов в хвое елей оказались мало информативными. Выявлены значительные положительные взаимосвязи накопления Cu и Cr в хвое елей ($r = 0,89$) вблизи металлургического предприятия в г. Гатчине и Cd и Pb ($r = 0,83$) на пробных площадях недалеко от Череповецкой государственной районной электрической станции. Положительная связь содержания элементов Ni и Cd ($r = 0,89$) и отрицательная корреляция концентраций Ni и Pb ($r = -0,88$) отмечены около автодорог в Любанском лесничестве. Возможно, положительные корреляции накопления в хвое ели Cd и Pb, а также Ni и Cd свидетельствуют о негативном влиянии на ельники антропогенных выбросов предприятий в Вологодской и автотранспорта в Ленинградской областях. Очевидно, информация о взаимосвязях отношений элементов в хвое будет полезна как для экологического мониторинга, так и для понимания режимов питания, физиологии ели в зонах антропогенного влияния.

Учитывая нелинейное изменение содержания элементов в хвое по мере удаления от источников загрязнений и большой разброс данных, можно сделать вывод о том, что для экологического мониторинга с применением ели европейской в качестве биоиндикатора важно оценивать:

коэффициенты концентрации (>1) «токсичных» элементов, активно исключаемых елью в фоновых насаждениях и суммарный показатель загрязнения, вычисленный на их основе;

коэффициенты концентрации жизненно важных микроэлементов Mn и Zn, аккумулируемых елью, а также исключаемого, но необходимого в оптимальных количествах, Fe.

Количество видов загрязняющих веществ, выбрасываемых стационарными и подвижными источниками, всегда значительно превышает число учитываемых соединений. Негативное воздействие комплекса поллютантов на насаждения ели европейской может быть выявлено по уменьшенным коэффициентам концентрации и дефицитным концентрациям Mn и (или) Zn или повышенным коэффициентам концентрации для Fe в хвое.

Данные подходы предлагается использовать при проведении исследований на территории Северо-Запада России и в регионах, для которых установлены фоновые концентрации элементов в хвое елей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреев А.Е., Баранова А.И., Калько Г.В. Генетическое разнообразие ели европейской на Северо-Западе России в естественных насаждениях, загрязненных тяжелыми металлами // Лесхоз. информ. 2023. № 1. С. 97–110.

Andreev A., Baranova A., Kalko G. Genetic Diversity of Norway Spruce in Natural Stands Contaminated with Heavy Metals in Varying Degrees in the North-West of Russia. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya = Forestry information*, 2023, no. 1, pp. 97–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.08>

2. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2021 году / Правит-во Вологод. обл., Деп. природ. ресурсов и охраны окруж. среды Вологод. обл. Вологда, 2022. 264 с.

Report on the State and Protection of the Environment of the Vologda Region in 2021. Vologda, Government of the Vologda Region, Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Vologda Region, 2022. 264 p. (In Russ.).

3. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 151 с.

Il'in V.B. *Heavy Metals in the Soil-Plant System*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Siberian Branch), 1991. 151 p. (In Russ.).

4. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. (In Russ.).

5. Копцик Г.Н., Лукина Н.В., Копцик С.В., Щербенко Т.А., Ливанцова С.Ю. Поглощение макроэлементов и тяжелых металлов елью при атмосферном загрязнении на Кольском полуострове // Лесоведение. 2008. № 2. С. 3–12.

Koptsik G.N., Lukina N.V., Koptsik S.V., Shcherbenko T.A., Livantsova S.Yu. Absorption of Macronutrients and Heavy Metals by Spruce under Atmospheric Pollution on the Kola Peninsula. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2008, no. 2, pp. 3–12. (In Russ.).

6. Кулагин А.А., Шагиева Ю.А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей / Рос. акад. наук, Уфим. науч. центр, Ин-т биологии. М.: Наука, 2005. 190 с.

Kulagin A.A., Shagieva Yu.A. *Woody Plants and Biological Conservation of Industrial Pollutants*. Russian Academy of Sciences, Ufa Scientific Centre, Institute of Biology. Moscow, Nauka Publ., 2005. 190 p. (In Russ.).

7. Луганский Н.А., Залесов С.В., Луганский В.Н. Лесоведение. Урал. гос. лесотехн. ун-т. Екатеринбург, 2010. 432 с.

Lugansky N.A., Zalesov S.V., Lugansky V.N. *Forestry*. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University, 2010. 432 p. (In Russ.).

8. Лукина Н.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. М.: Наука, 2005. 244 с.

Lukina N.V., Sukhareva T.A., Isaeva L.G. *Pollution-Induced Divergences and Rehabilitation Successions in Northern Taiga Forests*. Moscow, Nauka Publ., 2005. 244 p. (In Russ.).

9. Методика измерения массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. 16.2.2:2.3.71–2011 / Федер. служба по надзору в сфере природопольз. М., 2011. 45 с.

Methodology for Measuring Mass Fractions of Metals in Sewage Sludge, Bottom Sediments, Samples of Plant Origin Using Spectral Methods. PND F 16.2.2:2.3.71-2011. Moscow, Federal Service for Supervision of Natural Resources, 2011. 45 p. (In Russ.).

10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных и продукции растениеводства / М-во сельск. хоз-ва Рос. Федерации, Центр ин-т агрохим. обслуж. сел. хоз-ва (ЦИНАО). М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

Guidelines for the Determination of Heavy Metals in Agricultural Soils and Plant Products. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Central Institute of Agrochemical Service of Agriculture. Moscow, Central Institute of Agrochemical Service of Agriculture Publ., 1992. 61 p. (In Russ.).

11. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Биогеохимическая миграция элементов-загрязнителей в урбоэкосистеме // Теоретич. и приклад. экология. 2010. № 3. С. 27–32.

Mikhailova T.A., Shergina O.V. Biogeochemical Migration of Pollutants in an Urban Ecosystem. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology, 2010, no. 3, pp. 27–32. (In Russ.).

12. Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С., Бельский Е.А., Беспалова А.Ю., Головченко А.В., Горбачева Т.Т., Добровольская Т.Г., Добровольский В.В., Зукерт Н.В., Исаева Л.Г., Лапенис А.Г., Максимова И.А., Марфенина О.Е., Паникова А.Н., Пинский Д.Л., Полянская Л.М., Стайннес Е., Уткин А.И., Фронтасьева М.В., Цибульский В.В., Чернов И.Ю., Яценко-Хмелевская М.А. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. 616 с.

Nikonov V.V., Lukina N.V., Bezel' V.S., Bel'sky E.A., Bespalova A.Yu., Golovchenko A.V., Gorbacheva T.T., Dobrovol'skaya T.G., Dobrovol'sky V.V., Zukert N.V., Isaeva L.G., Lapenis A.G., Maksimova I.A., Marfenina O.E., Panikova A.N., Pinsky D.L., Polyanskaya L.M., Steinnes E., Utkin A.I., Frontas'eva M.V., Tsibulsky V.V., Chernov I.Yu., Yatsenko-Khmelevskaya M.A. *Trace Elements in Boreal Forests*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 616 p. (In Russ.).

13. Никонов М.В. Устойчивость лесов к воздействию природных и антропогенных факторов (на примере Новгородской области). Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2003. 296 с.

Nikonov M.V. *Forest Resistance to the Impact of Natural and Anthropogenic Factors (by the Example of the Novgorod Region)*. Veliky Novgorod, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 2003. 296 p. (In Russ.).

14. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. 684 с.

On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2021: State Report. Moscow, Ministry of Natural Resources and the Environment of the Russian Federation, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2022. 684 p. (In Russ.).

15. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 333 с.

Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. *Environmental Geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 333 p. (In Russ.).

16. Сухарева Т.А. Трансформация элементного состава почвы еловых лесов в условиях долговременного атмосферного загрязнения // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 568–572.

Sukhareva T.A. Transformation of the Elemental Composition of Soils of Spruce Forests in the Conditions of Long-Term Air Pollution. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii Geologicheskogo instituta Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossijskoy akademii nauk* = Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2019, no. 16, pp. 568–572. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.116>

17. Сухарева Т.А., Лукина Н.В. Химический состав и морфометрические характеристики хвои ели сибирской на Кольском полуострове в процессе деградационной сукцессии лесов // Лесоведение. 2004. № 2. С. 36–43.

Sukhareva T.A., Lukina N.V. Chemical Composition and Morphometric Characteristics of Siberian Spruce Needles on the Kola Peninsula in the Process of Degradative Forest Succession. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2004, no. 2, pp. 36–43. (In Russ.).

18. Сухарева Т.А., Лукина Н.В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104. <https://doi.org/10.7868/S0367059714020085>

Sukhareva T.A., Lukina N.V. Mineral Composition of the Assimilative Organs of Conifers after Reduction of Atmospheric Pollution in the Kola Peninsula. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2014, vol. 45, pp. 95–102. <https://doi.org/10.1134/S1067413614020088>

19. Тарханов С.Н. Формы внутрипопуляционной изменчивости хвойных в условиях атмосферного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 228 с.

Tarkhanov S.N. *Forms of Intrapopulation Variability of Conifers under Conditions of Atmospheric Pollution*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 228 p. (In Russ.).

20. Цветков В.Ф., Цветков И.В. Лес в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск, 2003. 354 с.

Tsvetkov V.F., Tsvetkov I.V. *Forest under Conditions of Aerotechnogenic Pollution*. Arkhangelsk, 2003. 354 p. (In Russ.).

21. Шагиева Ю.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях Башкирского Зауралья в условиях техногенеза: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2002. 22 с.

Shagieva Yu.A. *Heavy Metals in Soils and Plants of the Bashkir Trans-Urals under Technogenic Conditions*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Tolyatti, 2002. 22 p. (In Russ.).

22. Ari N., Ustazhanov M. Matplotlib in Python. *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, 2014, pp. 1–6.

<https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997585>

23. Arif Y., Singh P., Siddiqui H., Naaz R., Hayat S. Transition Metal Homeostasis and Its Role in Plant Growth and Development. *Microbial Biofertilizers and Micronutrient Availability*. Springer, Cham, 2022, pp. 159–178. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76609-2_8

24. Baker A.J.M. Accumulators and Excluders – Strategies in the Response of Plants to Heavy Metals. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, vol. 3, iss. 1–4, pp. 643–654.

<https://doi.org/10.1080/01904168109362867>

25. Bashir K., Rasheed S., Kobayashi T., Seki M., Nishizawa N.K. Regulating Subcellular Metal Homeostasis: The Key to Crop Improvement. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, art. no. 1192. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01192>

26. Clemens S. Molecular Mechanisms of Plant Metal Tolerance and Homeostasis. *Planta*, 2001, vol. 212, pp. 475–486. <https://doi.org/10.1007/s004250000458>

27. Garbe-Schönberg C.D., Reimann C., Pavlov V.A. Laser Ablation ICP-MS Analyses of Tree-Ring Profiles in Pine and Birch from N Norway and NW Russia – a Reliable Record of the Pollution History of the Area? *Environmental Geology*, 1997, vol. 32, pp. 9–16.

<https://doi.org/10.1007/s002540050188>

28. Grant C.A., Buckley W.T., Bailey L.D., Selles F. Cadmium Accumulation in Crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 1998, vol. 78, no. 1, pp. 1–17.

<https://doi.org/10.4141/P96-100>

29. Hänsch R., Mendel R.R. Physiological Functions of Mineral Micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, vol. 12, iss. 3, pp. 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>

30. Huettl R.F. Mg Deficiency – A “New” Phenomenon in Declining Forests – Symptoms and Effects, Causes, Recuperation. *Forest Decline in the Atlantic and Pacific Region*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1993, pp. 97–114. https://doi.org/10.1007/978-3-642-76995-5_7

31. Kashulina G., Reimann C., Salminen R., Chekushin V., Bogatyrev I. Chemical and Physical Degradation of Natural Soils in Northwestern Europe: Results of Large-Scale Regional Studies. *18th World Congress of Soil Science*, 2006. Available at: <https://crops.confex.com/crops/wc2006/techprogram/P15756.HTM> (accessed 13.09.22).

32. Kuboi T., Noguchi A., Yazaki J. Family-Dependent Cadmium Accumulation Characteristics in Higher Plants. *Plant and Soil*, 1986, vol. 92, pp. 405–415.

<https://doi.org/10.1007/BF02372488>

33. Ladanai S., Ågren G.I., Olsson B.A. Relationships Between Tree and Soil Properties in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* Forests in Sweden. *Ecosystems*, 2010, vol. 13, pp. 302–316. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9319-4>

34. *Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests. Part IV. Sampling and Analysis of Needles and Leaves*. United Nations Economic Commission for Europe, Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, 2000. Available at: <https://www.icp-forests.org/pdf/manual/2000/manual4.pdf> (accessed 19.07.19).

35. McKinney W. Pandas: a Foundational Python Library for Data Analysis and Statistics. *Python for High Performance and Scientific Computing*, 2011, vol. 14, no. 9, pp. 1–9.

36. Reimann C., Arnoldussen A., Boyd R., Finne T.E., Koller F., Nordgulen Ø., Englmaier P. Element Contents in Leaves of Four Plant Species (Birch, Mountain Ash, Fern and Spruce) along Anthropogenic and Geogenic Concentration Gradients. *Science of the Total Environment*, 2007, vol. 377, iss. 2–3, pp. 416–433.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.011>

37. Reimann C., Banks D., de Caritat P.D. Impacts of Airborne Contamination on Regional Soil and Water Quality: The Kola Peninsula, Russia. *Environmental Science & Technology*, 2000, vol. 34, iss. 13, pp. 2727–2732. <https://doi.org/10.1021/es9912933>

38. Reimann C., Koller F., Frengstad B., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P. Comparison of the Element Composition in Several Plant Species and their Substrate from a 1 500 000-km² Area in Northern Europe. *Science of the Total Environment*, 2001, vol. 278, iss. 1–3, pp. 87–112. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00890-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00890-1)

39. Reimann C., Koller F., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P. Influence of Extreme Pollution on the Inorganic Chemical Composition of Some Plants. *Environmental Pollution*, 2001, vol. 115, iss. 2, pp. 239–252. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00106-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00106-3)

40. Reimann C., Fabian K., Flem B., Andersson M., Filzmoser P., Englmaier P. Geosphere-Biosphere Circulation of Chemical Elements in Soil and Plant Systems from a 100 km Transect from Southern Central Norway. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 639, pp. 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.070>

41. Reimann C., Ottesen R.T., Andersson M., Arnoldussen A., Koller F., Englmaier P. Element Levels in Birch and Spruce Wood Ashes – Green Energy? *Science of the Total Environment*, 2008, vol. 393, iss. 2–3, pp. 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.015>

42. Sucharová J., Suchara I., Reimann C., Boyd R., Filzmoser P., Englmaier P. Spatial Distribution of Lead and Lead Isotopes in Soil B-Horizon, Forest-Floor Humus, Grass (*Avenella flexuosa*) and Spruce (*Picea abies*) Needles across the Czech Republic. *Applied Geochemistry*, 2011, vol. 26, iss. 7, pp. 1205–1214. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.04.009>

43. Terpilowski M.A. Scikit-Posthocs: Pairwise Multiple Comparison Tests in Python. *JOSS: The Journal of Open Source Software*, 2019, vol. 4, no. 36, art. no. 1169.

<https://doi.org/10.21105/joss.01169>

44. Trimbacher C., Weiss P. Norway Spruce: A Novel Method using Surface Characteristics and Heavy Metal Concentrations of Needles for a Large-Scale Monitoring Survey in Austria. *Water Air, and Soil Pollution*, 2004, vol. 152, pp. 363–386.

<https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000015368.95867.02>

45. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., van der Walt S.J., Brett M., Wilson J., Millman K.J., Mayorov N., Nelson A.R.J., Jones E., Kern R., Larson E., Carey C.J., Polat İ., Feng Y., Moore E.W., VanderPlas J., Laxalde D., Perktold J., Cimrman R., Henriksen I., Quintero E.A., Harris C.R., Archibald A.M., Ribeiro A.H., Pedregosa F., van Mulbregt P., SciPy 1.0 Contributors. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 2020, vol. 17, pp. 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

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

Научная статья

УДК 630*187

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-110-129

Типологическое и флористическое разнообразие пихтовых насаждений Тебердинского национального парка

Ю.М. Саблирова[✉], канд. техн. наук; ResearcherID: [HTT-1220-2023](https://orcid.org/0000-0003-4139-0335),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4139-0335>

Ф.А. Темботова, д-р биол. наук; ResearcherID: [AAO-1493-2020](https://orcid.org/0000-0001-8068-7647),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8068-7647>

Р.Х. Пшегусов, канд. биол. наук; ResearcherID: [I-8766-2012](https://orcid.org/0000-0002-6204-2690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6204-2690>

Н.Л. Цепкова, канд. биол. наук; ResearcherID: [IQS-3690-2023](https://orcid.org/0000-0002-6904-9705),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6904-9705>

Институт экологии горных территории им. А.К. Темботова РАН, ул. И. Арманд, д. 37а, г. Нальчик, Россия, 360017; sablirova@mail.ru[✉], tembotova_f@mail.ru, p_rustem@inbox.ru, cenelli@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.12.23 / Одобрена после рецензирования 01.03.24 / Принята к печати 03.03.24

Аннотация. Представлены результаты изучения флористического и типологического разнообразия лесов с участием *Abies nordmanniana* Тебердинского национального парка (Северо-Западный Кавказ). Геоботанические описания проводились на визуально однородных пробных площадках размером 30×30 м с использованием стандартных методов, принятых в геоботанике и лесной таксации. При классификации лесной растительности применяли эколого-фитоценотический подход. На основании данных обследования лесных участков Тебердинского национального парка составлена типологическая схема лесов с участием пихты Нордманна, выполнена их геоботаническая и таксационная характеристики. Исследуемые леса представлены 6 группами типов леса, включающими 11 типов леса. Отмечено 120 видов сосудистых растений, принадлежащих к 98 родам и 50 семействам. Преобладающими по числу видов семействами являются Asteraceae – 13, Rosaceae – 8, Ariaceae – 7, Lamiaceae, Poaceae – 6. Выявлено распространение пихтовых древостоев, в составе которых значительное участие принимают *Betula litwinowii* и *Populus tremula*, – пихтарников кисличного, манжетково-папоротникового и ясенниково-папоротникового типов, – что обусловлено как хозяйственной нагрузкой на коренные леса Тебердинского национального парка, так и близостью сообществ к верхней высотной границе леса. Наличие в лесном покрове вейниково-зеленомошного и лещиново-разнотравного сосняков, в составе которых отмечено значительное участие пихты, подтверждает, что леса Карачаево-Черкесии представляют собой зону, в которой хвойные леса Западного Кавказа плавно переходят в хвойные леса Центрального Кавказа, характеризующегося более континентальным климатом. Сравнение типологического разнообразия пихтовых лесов Тебердинского национального парка и других регионов Северного Кавказа и Закавказья указывает на уменьшение вариативности при сдвиге «спектра» в сторону смешанных лесов в Тебердинском национальном парке. Проведена оценка флористического разнообразия живого напочвенного покрова выделенных типов леса с использованием индексов доминирования, Шеннона, Симпсона, Маргалефа, Менхиника. Флористическое разнообразие напочвенного покрова в сообществах высокое, за исключением средне- и высокосомкнутых участков ясенниково-

© Саблирова Ю.М., Темботова Ф.А., Пшегусов Р.Х., Цепкова Н.Л., 2025



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

во-кисличных и кисличных пихтарников, где недостаточная инсоляция обуславливает низкое видовое богатство. В вейниково-зеленомошных сосняках и вейниковых пихтарниках индексы видового разнообразия принимают более низкие значения, что вызвано доминированием в напочвенном покрове одного вида (*Calamagrostis arundinacea*).

Ключевые слова: *Abies nordmanniana*, типологическое разнообразие, флористическое разнообразие, индексы разнообразия, Тебердинский национальный парк

Благодарности: Выражаем признательность д-ру биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории общей геоботаники БИН РАН Кучерову Илье Борисовичу за ценные рекомендации и замечания. Исследование выполнено в рамках госзадания «Закономерности пространственно-временной динамики луговых и лесных экосистем в условиях горных территорий (российский Западный и Центральный Кавказ)», проект № 075-00347-19-00.

Для цитирования: Саблирова Ю.М., Темботова Ф.А., Пшегусов Р.Х., Цепкова Н.Л. Типологическое и флористическое разнообразие пихтовых насаждений Тебердинского национального парка // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 110–129. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-110-129>

Original article

Typological and Floristic Diversity of Fir Stands in the Teberda National Park

Yuliya M. Sablirova[✉], Candidate of Engineering; ResearcherID: [HTT-1220-2023](https://orcid.org/0000-0003-4139-0335),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4139-0335>

Fatimat A. Tembotova, Doctor of Biology; ResearcherID: [AAO-1493-2020](https://orcid.org/0000-0001-8068-7647),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8068-7647>

Rustam Kh. Pshegusov, Candidate of Biology; ResearcherID: [I-8766-2012](https://orcid.org/0000-0002-6204-2690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6204-2690>

Nelli L. Tsepkova, Candidate of Biology; ResearcherID: [IQS-3690-2023](https://orcid.org/0000-0002-6904-9705),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6904-9705>

Tembotov Institute of Ecology of Mountain Territories of the Russian Academy of Sciences, ul. I. Armand, 37a, Nalchik, 360051, Russian Federation; sablirova@mail.ru[✉], tembotova_f@mail.ru, p_rustem@inbox.ru, cenelli@yandex.ru

Received on December 9, 2023 / Approved after reviewing on March 1, 2024 / Accepted on March 3, 2024

Abstract. The paper presents the results of a study of the floristic and typological diversity of forests with the participation of *Abies nordmanniana* in the Teberda National Park (North-West Caucasus). Geobotanical descriptions have been carried out on visually homogeneous sample plots measuring 30×30 m using standard methods adopted in geobotany and forest inventory. When classifying forest vegetation, an ecological and phytocenotic approach has been used. Based on the data from the survey of forest areas of the Teberda National Park, a typological scheme of forests with the participation of Nodmann fir has been compiled, and their geobotanical and inventory characteristics have been carried out. The forests under study are represented by 6 groups of forest types, including 11 forest types. 120 species of vascular plants have been identified, belonging to 98 genera and 50 families. The families with the largest number of species are Asteraceae – 13, Rosaceae – 8, Apiaceae – 7, Lamiaceae and Poaceae – 6 each. The distribution of fir stands, in which *Betula litwinowii* and *Populus tremula* are significantly involved, has been revealed – fir

forests of the wood sorrel, alchemilla-fern and woodruff-fern types, which is due to both the economic load on the indigenous forests of the Teberda National Park and the proximity of the communities to the upper altitudinal boundary of the forest. The presence of reed-green moss and hazel-forb pine forests in the forest cover, which include a significant participation of fir, confirms that the forests of Karachay-Cherkessia represent a zone in which the coniferous forests of the Western Caucasus smoothly merge into the coniferous forests of the Central Caucasus, characterized by a more continental climate. A comparison of the typological diversity of fir forests in the Teberda National Park and other regions of the North Caucasus and Transcaucasia indicates a decrease in variability with a shift in the “spectrum” towards mixed forests in the Teberda National Park. An assessment of the floristic diversity of the living ground cover of the identified forest types has been carried out using the dominance, Shannon, Simpson, Margalef and Menkhinik indices. The floristic diversity of the ground cover in the communities is high, with the exception of medium- and highly closed areas of woodruff-sorrel and wood sorrel fir forests, where insufficient insolation results in low species richness. In reed-green moss pine forests and reed fir forests, the indices of species diversity take on lower values, which is caused by the dominance of one species (*Calamagrostis arundinacea*) in the ground cover.

Keywords: *Abies nordmanniana*, typological diversity, floristic diversity, diversity indices, the Teberda National Park

Acknowledgements: The authors would like to express their gratitude to Ilya Borisovich Kucherov, Doctor of Biology, Senior Research Scientist at the Laboratory of General Geobotany of the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, for valuable recommendations and comments. The study was carried out within the framework of the state assignment “Patterns of Spatial and Temporal Dynamics of Meadow and Forest Ecosystems in Mountainous Areas (Russian Western and Central Caucasus)”, project no. 075-00347-19-00.

For citation: Sablirova Yu.M., Tembotova F.A., Pshegusov R.Kh., Tsepikova N.L. Typological and Floristic Diversity of Fir Stands in the Teberda National Park. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 110–129. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-110-129>

Введение

В связи с изменением климата и значительным антропогенным воздействием на лесные экосистемы обостряется вопрос сохранения сообществ, отличающихся уникальным флористическим составом и разнообразием. К таким сообществам относятся леса, образованные реликтом третичного периода *Abies nordmanniana* (Steven) Spach.

Ареал *A. nordmanniana* охватывает Кавказ, Закавказье и Малую Азию [12, 20, 26]. Пихта Нордманна, или кавказская, на Северном Кавказе произрастает в пределах высот 800–2000 м над ур. м., между Пшехо-Пшишским и Кубано-Терским водоразделами. Пихтовые леса Северного Кавказа наряду с выполнением важнейших экологических функций являются местом распространения редких и охраняемых видов растений и животных.

Пихтовые леса Тебердинского национального парка (ТНП), площадь которых составляет 21,3 тыс. га (20 % площади хвойных лесов), также уникальны по флористическому разнообразию и выполняемым ими экологическим функциям [9]. Сложные орографические и природно-климатические условия национального парка приводят к формированию на его территории значительного видового богатства и ценотического многообразия.

Изучением лесной флоры ТНП занимались многие ученые [4, 11 и др.]. Описанию лесной растительности в бассейне р. Теберда и на Архызском участке национального парка посвящены работы И.И. Тумаджанова [17], В.Н. Кононова [7]. Однако изменение климата, рекреационная нагрузка, несанкционированная вырубка лесов, занесение инвазивных видов могут привести к снижению видового богатства и ценотического разнообразия. В связи с этим требуются более детальные сведения о современном флористическом и типологическом разнообразии пихтовых лесов как одном из основных условий выполнения древостоями экологических функций [21, 23, 28, 30].

Исследование имеет особую актуальность в связи с широкомасштабным усыханием ели восточной в пихтово-еловых и еловых лесах ТНП [10, 13, 14]. При этом ожидаемы значительные сокращения площади пихто-ельников и ельников, что может привести к снижению лесобразующей роли ели восточной, а соответственно, и изменению состава и структуры лесов, образованных *A. nordmanniana* и *Picea orientalis*.

Целью настоящей работы является изучение флористического и типологического разнообразия, детальная геоботаническая характеристика лесов с участием и доминированием пихты Нордманна на территории ТНП.

Объекты и методы исследования

Тебердинский национальный парк (до 2021 г. Тебердинский государственный биосферный заповедник) расположен в пределах северного макросклона Западного Кавказа, в бассейнах р. Теберда и Кизгыч, представлен 2 участками – Тебердинским и Архызским (рис. 1).



Рис. 1. Район исследования – Тебердинский национальный парк

Fig. 1. The study area – the Teberda National Park

Климат умеренный, более сухой и континентальный, чем в верховьях р. Белая и Пшеха, где он близок к субтропическому климату Западного Закавказья [12]. По данным метеостанции «Теберда», среднегодовая температура –

6–9 °С, среднегодовое количество осадков – 695 мм [11]. Почвы района исследования под пихтовыми лесами – горные бурые лесные. Восточная граница распространения темнохвойных лесов проходит по Тебердино-Даутскому водоразделу, для которого характерно среднегодовое количество осадков 700 мм. Здесь наибольшее распространение получают сосновые леса, которые лучше приспособляются к снижению количества осадков и более теплому лету.

В 2012, 2020–2022 гг. были проведены детальные геоботанические маршрутные исследования лесов ТНП в пределах 1400–2100 м над ур. м. Описание растительности выполнялось на визуально однородных пробных площадках размером 30×30 м с использованием стандартных методов, принятых в геоботанике и лесной таксации [6, 16]. Всего была заложена 51 пробная площадь. Для каждой из них учет осуществляли по ярусам в процентной шкале проективных покрытий (ПП), также определяли формулу древостоя, средний диаметр и высоту каждого яруса, сомкнутость крон, полноту. Фиксировались общее ПП, видовой состав, ПП отдельных видов травяного и мохового ярусов. Видовую принадлежность сосудистых растений устанавливали по А.И. Галушко [3]. Наименования сосудистых растений приводятся согласно The World Flora Online [29].

При классификации лесной растительности использовали эколого-фитоценотический подход, тип леса рассматривали как тип лесного биогеоценоза. Группы типов леса выделяли по видовому составу древостоя, а также по доминирующим видам и их эколого-морфологическим группам в травяном и моховом ярусах. К одному типу леса относили фитоценозы, сходные по видовому составу всех ярусов. Для более точной классификации геоботанические описания анализировали с помощью кластерного анализа в программе Statistica 10.

Оценку флористического разнообразия живого напочвенного покрова лесов с участием пихты кавказской выполняли посредством расчета с помощью программы Past индексов доминирования, Шеннона, Симпсона, Маргалефа, Менхиника. Для выявления сходства видового состава выделенных сообществ применяли коэффициент Сьеренсена [8, 15, 25].

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей работе рассматриваются типы лесных биогеоценозов с участием пихты Нордманна в пределах ТНП. По результатам нашего исследования выделены 6 групп типов, включающих 11 типов леса. Характеристики древостоев разных типов леса представлены в табл. 1. Флористический состав и ПП видов всех ярусов – в табл. 2, 3.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев по типам леса The inventory characteristics of the stands by forest types

Тип леса	Ярус	Состав древостоя	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Сомкнутость крон	Относительная полнота
<i>Пихтарники мелко травно-зеленомошные</i>						
Пихтарник ясменниково- кисличный	I	10Пх	29,2	34,4	0,7	1,21
	II	10Пх	17,4	23,5	0,2	0,19

Окончание табл. 1

Тип леса	Ярус	Состав древостоя	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Сомкнутость крон	Относительная полнота
Букняк с пихтой широколиственно-кисличный	I	7Бк3Пх	26,5	42,0	0,7	0,67
	II	10Пх	15,4	19,2	0,2	0,25
Пихтарник папоротниково-зеленомошный	I	10Пх	19,8	25,4	0,6	0,43
	II	10Пх	13,8	18,2	0,25	0,28
Пихтарник кисличный	I	7Пх3Б	20,6	32,3	0,4	0,49
	II	6Пх4Б	15,1	19,5	0,3	0,26
<i>Пихтарники травяные</i>						
Пихтарник манжетково-папоротниковый	I	5Пх5Б	17,4	32,6	0,4	0,52
	II	5Пх5Б	12,6	17,6	0,2	0,28
Пихтарник папоротниково-ясменниковый	I	7Пх3Ос	33,3	88,4	0,6	0,94
	II	5Пх5Кл	16,6	20,8	0,3	0,18
Пихтарник вейниковый	I	10Пх	20,7	27,8	0,7	0,61
<i>Пихто-ельники мелколиственно-зеленомошные</i>						
Пихто-ельник гераниево-кисличный	I	6Е4Пх	26,0	44,0	0,3	0,29
	II	10Е	19,7	27,7	0,1	0,15
	III	10Е	9,6	12,1	0,1	0,09
<i>Пихто-ельники широколиственные</i>						
Пихто-ельник папоротниково-овсяницевоый	I	4Е3Бк3Пх	25,8	59,6	0,7	0,74
	II	10Е	21,2	34,4	0,1	0,21
	III	10Е	9,2	11,4	0,1	0,16
<i>Сосняки вейниково-зеленомошные</i>						
Сосняк вейниково-зеленомошный	I	7С3Пх	23,4	41,5	0,7	0,86
<i>Сосняки кустарниково-разнотравные</i>						
Сосняк лещино-разнотравный	I	10С	27,0	57,5	0,2	0,61
	II	4С3Пх3Е	16,3	28,0	0,4	0,31

Таблица 2

Общее проективное покрытие (%) ярусов насаждений с участием пихты Нордманна по типам леса в пределах ТНП
The total projective cover (%) of stands with the participation of Nordmann fir by forest type within the Teberda National Park

Ярус древостоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Подлесок	2–5	15–20	10	25–30	0	0	22	10	35	2	2
Травяной ярус	5–40	60–90	30–40	70–90	20–50	50–70	70–95	60–70	60–70	50–70	40–55
Моховой ярус	10	7	5	5	5–10	10	10	40–50	15	5–10	30

Примечание: Здесь и в табл. 3–5, на рис. 2: 1, 2, 3, 4 – пихтарники ясменниково-кисличный, манжетково-папоротниковый, кисличный, папоротниково-ясменниковый соответственно; 5 – букняк с пихтой широколиственно-кисличный; 6, 7 – пихто-ельники папоротниково-овсяницевоый и гераниево-кисличный соответственно; 8, 9 – сосняки вейниково-зеленомошный и лещино-разнотравный соответственно; 10, 11 – пихтарники вейниковый и папоротниково-зеленомошный соответственно.

Таблица 3

**Геоботаническая характеристика ярусов насаждений с участием пихты
Нордманна по типам леса в пределах ТНП**
**The geobotanical characteristics of forest layers with the participation of Nordmann
fir by forest types within the Teberda National Park**

Вид	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>1-й древесный подъярус</i>											
<i>Abies nordmanniana</i> (Steven) Spach	10	5	7	7	3	3	4	3	.	10	10
<i>Acer platanoides</i> L.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.
<i>A. trautvetteri</i> Medw.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Betula litwinowii</i> Doluch.	+	5	3	+	.	.	.	.	.	.	.
<i>B. pendula</i> L.	+	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.
<i>B. raddeana</i> Trautv.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Fagus orientalis</i> Lipsky	.	.	.	.	7	3	.	.	.	.	.
<i>Picea orientalis</i> (L.) Peterm.	.	.	.	.	.	4	6	+	.	.	.
<i>Pinus sylvestris</i> L.	+	+	+	.	.	.	.	7	10	.	+
<i>Populus tremula</i> L.	+	.	+	3	.	.	.	.	.	.	.
<i>2-й древесный подъярус</i>											
<i>Abies nordmanniana</i> (Steven) Spach	10	5	6	5	10	.	.	.	3	.	10
<i>Acer platanoides</i> L.	.	.	.	5	.	.	+	.	+	.	.
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Betula litwinowii</i> Doluch.	+	5	4	.	+	.	.	.	.	.	.
<i>B. raddeana</i> Trautv.										.	+
<i>Fagus orientalis</i> Lipsky	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.
<i>Picea orientalis</i> (L.) Peterm.	.	.	.	.	.	10	10	.	3	.	.
<i>Pinus sylvestris</i> L.	.	.	+	.	.	.	.	.	4	.	.
<i>Acer campestre</i> L.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>3-й древесный подъярус</i>											
<i>Picea orientalis</i> (L.) Peterm.	.	.	.	.	.	10	10	.	.	.	.
<i>Abies nordmanniana</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10
<i>Ярус подлеска</i>											
<i>Corylus avellana</i> L.	.	.	3	6	.	.	.	.	15	.	.
<i>Daphne glomerata</i> Lam.	.	5	.	.	.	.	.	.	5	.	.
<i>D. mezereum</i> L.	2	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Euonymus europaea</i> L.	.	.	.	8	.	.	.	.	2	.	.
<i>Ribes uva-crispa</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
<i>Lonicera steveniana</i> Fisch. ex Pojark.	.	.	3	2	.	.	.	.	2	.	.
<i>L. xylosteum</i> L.	.	.	.	.	.	.	4	.	.	.	.
<i>Prunus padus</i> L.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Rhododendron luteum</i> Sweet	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
<i>Ribes alpinum</i> L.	.	.	.	15	.	.	.	.	.	2	.
<i>Rubus caesius</i> L.	.	.	.	.	.	.	10	.	2	.	.
<i>R. idaeus</i> L.	.	10	.	.	.	.	3	.	2	10	.
<i>Salix caprea</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	5	.	.	.
<i>Sambucus nigra</i> L.	1	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	1	1	4	.	.	.	3	5	4	3	1

Продолжение табл. 3

Вид	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Травяной ярус</i>											
<i>Achillea millefolium</i> L.	1	.	.
<i>Aconitum nasutum</i> Fisch. ex Reichenb.	4
<i>A. orientale</i> Mill.	.	3	.	.	4	1	1	2	2	.	.
<i>Aegopodium podagraria</i> L.	5	.	.	.
<i>Alchemilla orthotricha</i> Rothm.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>A. xanthochlora</i> Rothm.	.	10	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Asarum caucasicum</i> N.Busch	3
<i>Asyneuma campanuloides</i> (M.Bieb.) Bornm.	1
<i>Asplenium trichomanes</i> L.	1	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Astrantia maxima</i> Pall.	.	2	2	.	.	2	.	.	.	.	.
<i>Athyrium distentifolium</i> Tausch ex Opiz	1	.	.	.	.	2	.	.	1	.	2
<i>A. filix-femina</i> (L.) Roth	10	.	.	.	.	2
<i>Betonica macrantha</i> K.Koch	.	6	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Persicaria bistorta</i> Samp.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth	.	.	1	.	1	.	5	35	.	38	1
<i>Campanula collina</i> Sims subsp. <i>collina</i>	.	1	.	2	.	.	.	.	.	.	.
<i>C. latifolia</i> L.
<i>Carex pilosa</i> Scop.	1	.	.	.	.	.
<i>Carum meifolium</i> Boiss.	2	.	.	0,5	.	.
<i>Chaerophyllum aureum</i> L.	.	.	.	3	.	.	.	.	3	3	2
<i>Epilobium angustifolium</i> L.	2	.	.	.	.
<i>Chrysosplenium alternifolium</i> L.	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cicerbita racemosa</i> Beauverd	1	.
<i>Cirsium obvallatum</i> (M.Bieb.) M.Bieb.	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Colchicum speciosum</i> Steven	1	.	.	.	.
<i>Dolichorrhiza renifolia</i> (C.A.Mey.) Galushko	5
<i>Drymosiphon grandiflorus</i> (L.) Melnikov	1	.	.	.	2	.	1	.	.	1	1
<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P.Fuchs	5	1	.	.	.	.
<i>D. filix-mas</i> (L.) Schott	1	10	.	10	3	.	5	.	1	.	.
<i>Equisetum sylvaticum</i> L.	1	.	.	.
<i>Erysimum aureum</i> M.Bieb.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.
<i>Festuca drymeja</i> Mert. & W.D.J. Koch	.	1	.	.	.	10	.	.	.	.	.
<i>Fragaria vesca</i> L.	.	6	.	.	.	.	5	5	5	5	2
<i>Galega orientalis</i> Lam.	1	.	.	.	2	.	.

Продолжение табл. 3

Вид	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Galium odoratum</i> Scop.	4	2	1	18	1	.	8	4	7	.	.
<i>G. rotundifolium</i> L.	1	.	.	.	.	.	.	.	5	.	.
<i>Geranium robertianum</i> L.	.	.	.	2	.	.	10	.	.	.	.
<i>G. sylvaticum</i> L.	.	5	2	3	.	.	.	.	5	1	2
<i>G. platypetalum</i> Fisch. & C.A.Mey.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
<i>Geum urbanum</i> L.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Glechoma hederacea</i> L.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.
<i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newm.	.	3	.	.	.	.	.	.	2	.	12
<i>Heracleum sommieri</i> Manden	.	.	.	3	.	.	.	.	2	.	.
<i>Hieracium transiens</i> (Freyn) Freyn subsp. <i>erythrocarpum</i> (Peter) Greuter	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Impatiens noli-tangere</i> L.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lamium album</i> L.	.	0,5	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lapsana communis</i> L. subsp. <i>grandiflora</i> (M.Bieb.) P.D.Sell	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	2
<i>Onoclea struthiopteris</i> Roth	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.
<i>Milium effusum</i> L.	.	3	.	2	.	2	2	.	.	1	1
<i>Lactuca muralis</i> (L.) Gaertn.	.	.	.	.	1	.	5	.	.	.	.
<i>Myosotis sylvatica</i> H.Mart.	.	2	.	3	.	.	7	.	.	.	.
<i>M. sparsiflora</i> J.C.Mikan ex Pohl	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Orthilia secunda</i> (L.) House	.	.	.	.	1	1	1	.	.	.	.
<i>Oxalis acetosella</i> L.	15	5	25	15	20	10	12	5	1	10	5
<i>Paris incompleta</i> M.Bieb.	1	.	.	.	0,5	.	.	.	.	.	.
<i>P. quadrifolia</i> L.	.	.	.	1	.	0,5	.	.	.	.	.
<i>Phegopteris connectilis</i> (Michx.) Watt	1	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
<i>Phleum alpinum</i> L.	.	0,5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Poa annua</i> L.	2	0,5	.	.	.	.	.	.	.	2	.
<i>P. remota</i> Forselles	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Polygonatum orientale</i> Desf.	.	.	.	3	.	.	.	.	3	.	.
<i>P. verticillatum</i> (L.) All.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.
<i>Polypodium vulgare</i> L.	1	.	.	.	.	.	0,5	.	1	.	.
<i>Polystichum lonchitis</i> (L.) Roth	.	.	.	.	0,5	0,5	.	.	.	.	.
<i>Primula veris</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	2	3	.	.
<i>Prunella vulgaris</i> L.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
<i>Pulmonaria mollis</i> Wolff ex F.Heller	2	.	.	.	.	3	.	5	7	.	.
<i>Pyrola chlorantha</i> Sw.	.	.	.	0,5	.	.	.	.	.	.	.
<i>P. minor</i> L.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus repens</i> L.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sanicula europaea</i> L.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.
<i>Sedum gracile</i> C.A.Mey.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.

Окончание табл. 3

Вид	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Phedimus stoloniferus</i> (S.G.Gmel.) 't Hart	1	.	.	.	.	.	1	.	3	.	.
<i>Jacobaea racemosa</i> (M.Bieb.) Pelsers subsp. <i>racemosa</i>	1	.	.	3	2	.	8	.	.	.	.
<i>Senecio renifolius</i> (C.A.Mey.) Sch.Bip.	10	1	.	.	.	.
<i>Seseli alpinum</i> M.Bieb.	2	0,5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Solidago virgaurea</i> L.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Stachys sylvatica</i> L.	0,5	.	.	.	.
<i>Symphytum asperum</i> Lepech.	2	.	.	.	.	.	.
<i>Telekia speciosa</i> (Schreb.) Baumg.	1	.	.	.	.
<i>Tephrosia cladobotrys</i> (Ledeb.) Griseb. & Schenk subsp. <i>subfloccosa</i> (Schischk.) Greuter	0,5	.	.	.	.
<i>Thalictrum minus</i> L.	2	.	.
<i>Tragopogon graminifolius</i> DC.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Trifolium canescens</i> Willd.	.	1	.	.	.	.	.	.	3	.	.
<i>Urtica dioica</i> L.	.	.	.	5	1	.	.	.	.	.	.
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	5	.
<i>Valeriana alliariifolia</i> Vahl	1	2	2	.	.	.	.
<i>Veratrum lobelianum</i> Bernh.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Veronica gentianoides</i> Vahl	2	.	.	.	.
<i>V. officinalis</i> L.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Viola elatior</i> Fr.	1	.	.
<i>Моховой ярус</i>											
<i>Anomodon attenuatus</i> (Hedw.) Huebener	4	.	.	2	1	.	.	.	2	.	.
<i>Brachythecium rivulare</i> Schimp.	20	.	.	.
<i>Dicranum montanum</i> Hedw.	2	.	.	.	.	2	1	.	.	1	.
<i>D. scoparium</i> Hedw.	4	.	.	2	.	2	2	.	2	.	2
<i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Schimp.	3	.	.	.	.	.	.
<i>Plagiomnium cuspidatum</i> (Hedw.) T.J.Kop.	.	2	2	.	.	2	3	.	2	.	3
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.	.	2	.	.	2	3	2	10	2	4	15
<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i> (Hedw.) Warnst.	5	1	.	.
<i>Sanionia uncinata</i> (Hedw.) Loeske	.	1	2	1	2	.	.	.	.	2	7
<i>Schistidium papillosum</i> Culm.	2	1	3
<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.	.	2	1	.	.	1	2	15	4	.	.

Примечание: Для древесостя приведена формула по составу, «+» – примесь менее 1. Для подлеска, травяного и мохового ярусов указано обилие видов в процентах, «+» – единичное участие вида в составе яруса.

На территории исследования широко распространены сообщества **пихтарников мелкотравно-зеленомошных**, которым свойственны разновозрастные, чистые или смешанные по составу средне- и высокополнотные, средне- и высокосомякнутые древостои. Кустарниковый ярус не выражен.

Сообщества пихтарника ясенниково-кисличного (*Abietum galiosoxalidosum*) характеризуются одно- либо двухъярусным древесным пологом, приурочены к склонам северо-западной и северо-восточных экспозиций, при крутизне 5–15°. Древостои относятся к I классу бонитета, образованы *Abies nordmanniana*, единично присутствуют *Betula pendula*, *B. litwinowii*, *Fagus orientalis*, *Populus tremula*, *Pinus sylvestris*. Подлесок имеет ПП 2–5 %. Лесовозобновление очень слабое. Подрост приурочен к опушкам: *Pinus sylvestris* – 256 шт./га; *Abies nordmanniana* – 711 шт./га; *Picea orientalis* – 167 шт./га. Из-за высокой сомкнутости древесного полога, а соответственно, и недостаточности проникающего сквозь него солнечного света травяной ярус характеризуется низким ПП – 5–40 %. Доминирует бореонеморальный мезофит *Oxalis acetosella*, значимым спутником которого выступает третичный неморальный реликт *Galium odoratum*. ПП мохового яруса – 10 %.

Древостои пихтарника кисличного (*Abietum oxalidosum*) имеют II класс бонитета, относятся к разновозрастным, сложным по составу, двухъярусным. Они сформированы *Abies nordmanniana* с примесью *Betula litwinowii*, приурочены к склонам юго-западной экспозиции крутизной 10–20°. В ярусе подлеска с ПП 10 % зарегистрированы *Corylus avellana*, *Lonicera steveniana*, *Sorbus aucuparia*. Подрост практически не развит, единично отмечены экземпляры *Fagus orientalis*. Травяной ярус имеет общее ПП 30–40 %. Доминирует *Oxalis acetosella*. Неморальные виды в составе яруса не достигают значимых покрытий. ПП мохового яруса равняется 5 %.

Пихтарник папоротничково-зеленомошный (*Abietum gymnocarpiosylocomiosum*) представляет собой древостои III класса бонитета, двух- или трехъярусные, разновозрастные. Они образованы *Abies nordmanniana*, единично отмечены *Pinus sylvestris* и *Betula raddeana*. Приурочены к склонам северо-западной экспозиции крутизной 15–25°. Подлесок почти отсутствует, единично встречена лишь *Sorbus aucuparia*. Лесовозобновление слабое, представлено *Abies nordmanniana* – 2344 шт./га. В травяном ярусе с общим ПП до 55 % доминирует бореально-лесной мезофит *Gymnocarpium dryopteris*. Хорошо развит моховой ярус с ПП 30–50 %.

К рассматриваемой группе тяготеет и букняк с пихтой широколиственный (*Abieto-Fagetum nemoriherboso-oxalidosum*). Это смешанные по составу древостои II класса бонитета, в формировании которых участвуют *Abies nordmanniana*, *Fagus orientalis*, единично присутствуют *Acer platanoides*, *Betula litwinowii*. Лесные участки распространены на склонах северо-западной экспозиции крутизной 10–15°. Ярус подлеска не развит. Лесовозобновление очень слабое, представлено *Abies nordmanniana* – 278 шт./га, *Fagus orientalis* – 450 шт./га. ПП травяного яруса – 20–50 %, доминирует *Oxalis acetosella*, также зафиксированы *Polystichum lonchitis*, *Valeriana alliariifolia*, *Paris incompleta*, *Calamagrostis arundinacea*, *Galium odoratum* и др. Моховой ярус характеризуется ПП 5–10 %.

Пихтарники травяные представлены сообществами со смешанными сложными по составу разновозрастными древостоями и хорошо развитым напочвенным покровом.

Пихтарник вейниковый (*Abietum calamagrostosum*) – это древостои III класса бонитета, одноярусные из *Abies nordmanniana*. Сообщества распространены на склонах северной, северо-западной экспозиций, крутизна – 5–15°. В подлеске с ПП до 15 % участвуют *Sorbus aucuparia*, *Rubus idaeus*, *Ribes alpinum*. Лесовозобновление очень слабое: *Abies nordmanniana* – 778 шт./га. Для травяного яруса при ПП 50–60 % характерно преобладание *Calamagrostis arundinacea* с ПП до 40 %. Густой травяной покров мешает развитию мхов, ПП которых составляет лишь 5–7 %.

Пихтарник манжетково-папоротниковый (*Abietum alchemilloso-filicosum*) составляют древостои IV класса бонитета, двухъярусные, сложные по составу, образованные пихтой с существенной примесью берез (*Betula litwinowii*, *B. pendula*, *B. raddeana*), также встречаются *Acer trautvetterii*, *Pinus sylvestris*. Подлесок с ПП 15–20 % сформирован *Sorbus aucuparia*, *Padus avium*. Лесовозобновление слабое, в ярусе подроста расположены *Abies nordmanniana* – 933 шт./га, *Betula raddeana* – 278 шт./га. ПП травяного яруса равняется 60–90 %. В числе его доминантов отмечены лесные мезофиты (*Dryopteris filix-mas*), сочетающиеся с горно-луговыми (*Alchemilla xanthochlora* и иные виды из состава комплекса *A. vulgaris* s.l.), что отражает близость сообществ к верхней высотной границе леса. *Oxalis acetosella* переходит на роль субдоминанта. В качестве сопутствующих видов присутствуют и другие горно-луговые мезофиты: *Lamium album*, *Betonica macrantha*, *Seseli alpinum*, *Phleum alpinum*, *Poa annua*. Представлены и гигромезофиты, например, *Chrysosplenium alternifolium*.

Пихтарник папоротниково-ясменниковый (*Abietum filicoso-galiosum*) – это древостои I класса бонитета, двухъярусные, разновозрастные, они расположены на склонах южной и юго-восточной экспозиций при крутизне склона 5–15°. *Abies nordmanniana* и *Populus tremula* образуют I ярус, II ярус – *Acer platanoides* и *Abies nordmanniana*. Подлесок с ПП 25–30 % сформирован *Corylus avellana*, *Lonicera steveniana*, *Euonymus europaea*, *Ribes alpinum*. Подрост не развит, единично встречаются *Acer platanoides* и *Abies nordmanniana*. ПП травяного яруса – 70–90 %, в его составе преобладают неморальные мезофильные виды *Galium odoratum* и *Dryopteris filix-mas*.

Группа пихто-ельников мелкоотравно-зеленомошных – это пихто-ельник гераниево-кисличный (*Abieto-Piceetum geranioso-oxalidosum*). Сообщество составлено смешанными древостоями, доминирует *Picea orientalis*, немного реже встречается *Abies nordmanniana*, приурочены к склонам восточной, юго-восточной экспозиций, крутизной 20–35°. Полнота и сомкнутость I и II древесных подъярусов пихто-ельников гераниево-кисличных значительно снизились из-за усыхания ели восточной (табл. 1). Подрост *Picea orientalis* и *Abies nordmanniana* благонадежный, его количество равняется 278 и 133 шт./га соответственно. В подлеске отмечены *Lonicera xylosteum*, *Acer platanoides*, *Sambucus nigra*, *Rubus idaeus*, *Sorbus aucuparia*, *Rubus caesius*.

Травяной ярус имеет большое ПП (70–95 %), что связано с уменьшением полноты древостоя в результате усыхания *Picea orientalis*. В числе доминантов яруса сочетаются *Oxalis acetosella* и эвтрофный неморальный вид *Geranium robertianum*. В качестве сопутствующих видов отмечены *Stachys sylvatica*, *Aconitum orientale*, *Tephrosia subfloccosa*, *Valeriana alliariifolia*, *Dryopteris filix-mas*, *Polypodium vulgare*, *Calamagrostis arundinacea*. Моховой ярус характеризуется ПП 10 %.

Группу **пихто-ельников широколиственных** формирует пихто-ельник папоротниково-овсянищевый (*Abieto-Piceetum filicoso-festucosum*). Смешанные по составу, разновозрастные древостои I–II классов бонитета распространены на склонах северо-западной экспозиции, крутизна склона – 5–15°. В древостое преобладает *Picea orientalis*, немного меньше *Abies nordmanniana*, примешивается *Fagus orientalis*. Лесовозобновление удовлетворительное: *Picea orientalis* – 667 шт./га, *Abies nordmanniana* – 978 шт./га, *Fagus orientalis* – 722 шт./га. Подлесок не выражен, единично отмечен *Daphne mezereum*.

ПП травяного яруса – 50–60 %, его высота колеблется в пределах 70–110 см. В составе яруса неморальные мезофиты (*Festuca drymeja*, *Dryopteris filix-mas*, *Polystichum lonchitis*, *Lamium album*, *Paris incompleta*, *Galium odoratum*) сочетаются с бореонеморальными (*Paris quadrifolia*, *Milium effusum*, *Oxalis acetosella*). ПП мохового яруса составляет 10 %.

Пихтово-еловые леса с участием *Picea orientalis* на Северном Кавказе в настоящее время сохранились только на территории Кавказского заповедника (в бассейне р. Малая Лаба) и ТНП. Часть геоботанических описаний была проведена в пихто-ельниках, подверженных усыханию. В основном усыхают ели, достигшие естественной спелости [10, 14]. Всходы и подрост при этом не страдают.

Лесотаксационные характеристики на пробных площадях сложно измерить, т. к. многие деревья повалены, нетронутыми остались только экземпляры пихты кавказской и ели восточной, не достигшие IV класса возраста.

В сосняках вейниково-зеленомошных (*Pinetum calamagrostosylvocomiosum*) доминирует *Pinus sylvestris*, заметную роль играет *Abies nordmanniana*, также на пробных площадях отмечена *Picea orientalis*. Древостои характеризуются II классом бонитета. Лесные участки распространены на склонах северной, северо-западной экспозиций, при крутизне склона 20–35°. Подлесок с ПП 10 % образован *Sorbus aucuparia*, *Salix caprea*. Лесовозобновление очень слабое: *Fagus orientalis* – 122 шт./га, *Abies nordmanniana* – 256 шт./га, единично – *Betula pendula* и *Populus tremula*.

ПП травяного яруса составляет 60–70 %, в его составе преобладает светолюбивый *Calamagrostis arundinacea*, также отмечены *Polygonatum orientale*, *Seseli alpinum*, *Oxalis acetosella* и др. Хорошо выражен моховой ярус с ПП до 50 %.

В группу **сосняков кустарниково-разнотравных** входит сосняк лещиново-разнотравный (*Pinetum coryloso-herbosum*). Древостои смешанные, I класса бонитета, в них к *Pinus sylvestris* примешиваются *Abies nordmanniana*, *Fagus orientalis*, *Picea orientalis*. Единично отмечены *Betula pendula*, *Acer platanoides*. Насаждения приурочены к склонам северо-восточной экспозиции крутизной 25–35°. Подлесок с ПП до 35 % включает в себя *Corylus avellana*, *Euonymus europaea*, *Sorbus aucuparia*, *Salix caprea*. Лесовозобновление на пробных площадях данного типа леса очень слабое, подрост представлен *Picea orientalis* – 100 шт./га, *Abies nordmanniana* – 111 шт./га, *Acer platanoides* – 144 шт./га, *Fagus orientalis* – 44 шт./га.

Травяной покров полидоминантный, богат видами, ПП – 60–70 %. Его основу образуют представители неморально-лесного мезофильного широколиственного: *Aegopodium podagraria*, *Galium odoratum*, *Pulmonaria mollis*. Из числа бореальных видов к ним присоединяется *Geranium sylvaticum*. Моховой ярус имеет ПП 15 %.

Всего в выделенных типах леса с участием *Abies nordmanniana* ТНП, по результатам наших исследований, отмечено 120 видов сосудистых растений, принадлежащих к 98 родам и 50 семействам и 11 видов мохообразных. Преобладающими по числу видов семействами являются: Asteraceae – 13, Rosaceae – 8, Apiaceae – 7, Lamiaceae, Poaceae – 6. Меньшим числом видов представлены Betulaceae и Ericaceae – по 5 видов, Woodsiaceae, Ranunculaceae, Boraginaceae – по 4 вида, Aceraceae, Pinaceae, Dryopteridaceae, Fabaceae, Campanulaceae, Geraniaceae – по 3 вида. Остальные семейства – это 1–2 вида.

Сравнение древостоев разных типов леса по флористическому сходству показывает, что они существенно несходны по видовому составу (табл. 4). Близкие значения индекса Сьеренсена характерны для пихтарников вейникового и папоротничково-зеленомошного, пихто-ельников папоротниково-овсяницевого и гераниево-кисличного. В обоих случаях коэффициент сходства равен 0,52. Также попарно сходны между собой пихтарники ясенниково-кисличный и кисличный, манжетково-папоротниковый и кисличный, сосняк вейниково-зеленомошный и пихтарник кисличный, что можно объяснить экологически близкими условиями произрастания. При этом пихтарник папоротниково-ясенниковый резко отличается по видовому составу от пихто-ельника папоротниково-овсяницевого и сосняка вейниково-зеленомошного.

Таблица 4

Коэффициенты флористического сходства Сьеренсена между ценофлорами разных типов леса с участием *Abies nordmanniana* в ТНП
Sørensen floristic similarity coefficients between coenofloras of different forest types with the participation of *Abies nordmanniana* in the Teberda National Park

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0,23	0,44	0,32	0,31	0,33	0,26	0,26	0,21	0,24	0,24
2			0,40	0,26	0,27	0,23	0,29	0,30	0,37	0,29	0,32
3				0,31	0,29	0,23	0,24	0,40	0,22	0,26	0,34
4					0,28	0,17	0,27	0,12	0,32	0,26	0,26
5						0,32	0,37	0,29	0,22	0,29	0,28
6							0,52	0,20	0,26	0,17	0,30
7								0,31	0,38	0,31	0,30
8									0,33	0,32	0,31
9										0,21	0,33
10											0,52

С помощью кластерного анализа геоботанических описаний древостоев различных типов леса, построена дендрограмма (рис. 2). Как видно, достоверно выделяются 5 кластеров.

Обособление в отдельный кластер сосняка лециново-разнотравного, который отличается сложной структурой древостоя, высоким видовым богатством, хорошо выраженными подлеском и травяным покровом, вероятно, можно объяснить приуроченностью этих сообществ к богатым, но повышено дренированным экотопам, что, в свою очередь, обусловлено крутизной и экспозицией горных склонов.

Близки между собой и сосняк вейниково-зеленомошный и пихтарник вейниковый с доминированием *Calamagrostis arundinacea* в травяном ярусе. В единый кластер объединяются также пихто-ельники гераниево-кисличный и папоротниково-овсяницевоый. В 5-м кластере сходными по составу ценофлор являются пихтарники кисличных и широколиственно-кисличных типов. Наиболее удален от них пихтарник папоротничково-зеленомошный, который отличается хорошо развитым, местами смыкающимся напочвенным покровом бореально-го состава.

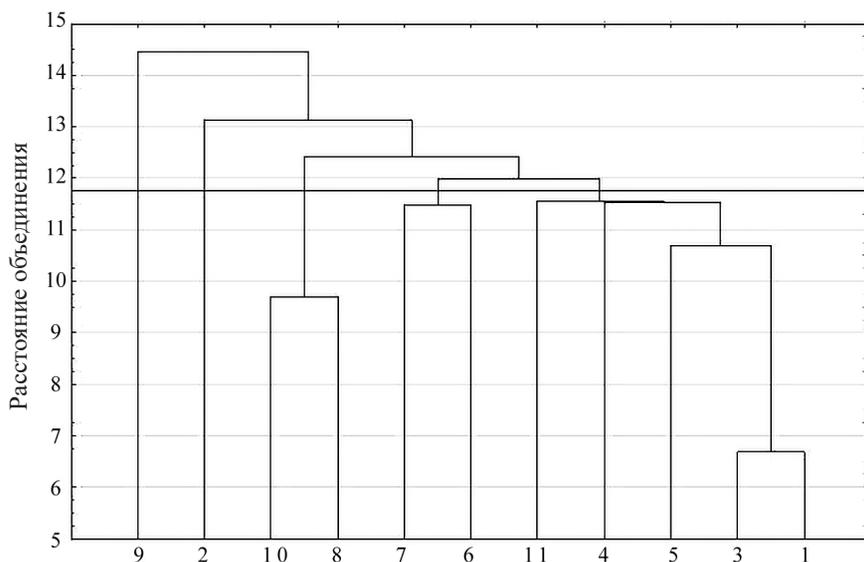


Рис. 2. Дендрограмма типов леса с участием пихты кавказской, полученная с использованием метода ближайшего соседа

Fig. 2. The dendrogram of forest types with the participation of Caucasian fir obtained using the nearest neighbour method

Важнейшей частью изучения растительных сообществ является оценка их флористического разнообразия [22, 24]. Напочвенный покров выделенных типов леса характеризуется достаточно высоким видовым богатством, за исключением 4 типов леса (табл. 5). Сравнительно небогаты по числу видов (9–19) сосняки вейниково-зеленомошные, пихтарники кисличные, ясменниково-кисличные и вейниковые. Наиболее высокое видовое богатство яруса отмечено для пихто-ельника гераниево-кисличного, сосняка лещиново-разнотравного, пихтарника манжетково-папоротникового.

Индексы Менхиника и Маргалефа, позволяющие оценить видовое богатство напочвенного покрова, принимают наибольшие значения в пихтарнике манжетково-папоротниковом, пихто-ельнике гераниево-кисличном, сосняке лещиново-разнотравном. Низкие показатели установлены для пихтарников кисличного и вейникового, сосняка вейниково-зеленомошного.

Для характеристики выравненности распределения видов при учете видового разнообразия напочвенного покрова применяли индексы Шеннона, Симпсона. Наименьшее биологическое разнообразие, согласно значению индекса Шеннона, свойственно для пихтарников кисличных и вейниковых (1,34 и 1,55 соответственно), высокое видовое богатство и снижение степени доминирования одного вида зафиксировано для сосняков лещиново-разнотравных.

Таблица 5

Индексы видового разнообразия напочвенного покрова для выделенных типов леса с участием *Abies nordmanniana* на территории ТНП
The species diversity indices of ground cover for the selected forest types with the participation of *Abies nordmanniana* in the territory of the Teberda National Park

Индекс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Доминирования	0,14	0,05	0,45	0,10	0,13	0,09	0,06	0,16	0,05	0,28	0,09
Симпсона	0,86	0,95	0,55	0,91	0,87	0,91	0,94	0,84	0,95	0,72	0,91
Шеннона	2,48	3,21	1,34	2,80	2,58	2,71	3,11	2,14	3,27	1,55	2,80
Менхиника	2,77	3,34	1,46	2,70	3,00	2,73	3,31	1,22	3,59	1,72	2,68
Маргалефа	4,68	6,89	2,20	5,52	5,17	5,05	6,98	2,53	7,10	3,23	5,25
Число видов	19	32	9	26	21	22	33	13	32	15	24

Изменение индекса Симпсона для разных типов леса также указывает на высокое видовое разнообразие в сосняках лещиново-разнотравных и наименьшее – в пихтарниках кисличных и вейниковых.

Сравнение типологического разнообразия ТНП и других регионов Северного Кавказа и Закавказья говорит о снижении такой вариативности. Так, А.Я. Орлов [12] и С.М. Бебия [1] для пихтовых лесов Северного Кавказа выделяют следующие группы типов: субальпийские, овсяницевые, с колхидским подлеском, папоротниково-разнотравные, папоротниковые, мертвопокровные, ожиновые, вейниковые. Для буково-пихтовых лесов этими авторами обозначены чернично-падубовые, рододендроновые, овсяницевые, папоротниково-разнотравные, папоротниковые группы типов леса. Из перечисленных групп для ТНП нами не обнаружены пихтарники с колхидским подлеском, ожиновые, субальпийские. Также в настоящей работе не выделяются пихтарники мертвопокровные: низкое проективное покрытие приземных ярусов рассматривается как признак характерной стадии сукцессии, но сообщество не ограничивается как тип леса.

Е.А. Белоновская и О.В. Морозова [2], а также А.А. Французов [18], следуя методу эколого-флористической классификации школы Ж. Браун-Бланке, выделяют такие темнохвойно-лесные ассоциации, как *Abieti nordmannianae–Fagetum orientalis*, *Ilici colchicae–Abietetum nordmannianae* и *Rhododendro pontici–Fagetum orientalis*. Однако на территории ТНП нами не выявлены типы леса с участием колхидских кустарников. Ассоциация *Petasito albae–Abietetum nordmannianae* соответствует пихтарнику папоротниково-ясенниковому, ассоциация *Calamagrostio arundinaceae–Abietetum nordmannianae* – пихтарнику вейниковому.

В пихтовых лесах Кавказского заповедника А.А. Французов зафиксировал также ассоциацию *Festuco drymejae–Abietetum nordmannianae*, которая соответствует описанному нами пихтарнику овсяницевого для бассейнов р. Белая и Малая Лаба [27]. По результатам наших описаний, в смешанных лесах с участием пихты и доминированием в напочвенном покрове *Festuca drymeja* для ТНП произрастает пихто-ельник папоротниково-овсяницевого.

К.Ю. Голгофской [5] разработана лесотипологическая схема для бассейна р. Белая, включающая 24 группы типов леса, в состав древостоев которых входят хвойные лесобразующие виды. Результаты сопоставления этих типов с выявленными нами также говорят о более низком типологическом разнообразии лесов с участием пихты в ТНП. Помимо типов леса, упомянутых выше, нами

также не обнаружены буко-пихтарники каменистые, скальные, саблевиднобуковые. В горах Турции участие *Abies nordmanniana* характерно для пихтово-сосновых (*Abieti nordmannianae–Pinetum sylvestris*, *Lilio ciliati–Pinetum sylvestris*), пихтово-еловых (*Abieti nordmannianae–Piceetum orientalis*, *Vaccinio myrtilli–Piceetum orientalis*), пихтово-буковых (*Pyrolo secundae–Fagetum orientalis*) и кленово-пихтовых (*Acero tauricoli–Abietetum cilicicae*) лесов [19].

Ранее нами были проведены исследования в бассейнах р. Белая и Малая Лаба на территории Кавказского заповедника [27]. Выявлено превосходящее типологическое разнообразие лесов с участием *Abies nordmanniana* по сравнению с ТНП, что связано с более благоприятными условиями произрастания. На территории ТНП не обнаружены типы леса с выраженным подлеском из *Rhododendron ponticum* L., пихтарники с буком недотроговой и ежевичный, пихтарники крестовниково-вейниковый и овсяницевоый (без крупных папоротников).

В.В. Онищенко [9] для пихтовых формаций выделял следующие типы леса: пихтарники разнотравно-кисличные, пихтарник папоротниковый, пихтарник разнотравно-папоротниковый, пихтарник вейниково-разнотравный. Нами в числе чистых пихтарников названы ясенниково-кисличные, вейниковые и папоротничково-зеленомошные. Для смешанных по составу древостоев, в которых участвует *Abies nordmanniana*, классифицировано 8 типов леса.

А.П. Гераськина и Н.Е. Шевченко [4] в работе по основным типам леса в бассейне р. Кизгыч описывают буково-елово-пихтовые и елово-пихтовые бореально-неморально-зеленомошные сообщества, а также ксеромезофитные сосняки с пихтой, елью и березой. Все эти типы соответствуют рассмотренным нами в настоящей работе.

Заключение

Оценена типологическая и флористическая структуры лесов, образцованных *Abies nordmanniana*, на территории Тебердинского национального парка. Приведены флористическая, геоботаническая и таксационная характеристики выделенных типов леса. Для большинства рассмотренных лесных биогеоценозов свойственна сложная разновозрастная структура. Сопоставление типологических спектров лесов с участием пихты на территории Тебердинского национального парка и в других регионах Кавказа и Закавказья выявляет тенденцию к снижению типологического разнообразия этих лесов в пределах парка, а также к «сдвигу» спектра в сторону смешанных лесов. Поскольку коренные леса Тебердинского национального парка нарушены хозяйственной деятельностью (строительство гостевых домов, рекреационная нагрузка), распространены типы пихтовых лесов, в составе древостоев которых значительное участие принимают *Betula litwinowii* и *Populus tremula*, – пихтарники кисличный, пихтарник манжетково-папоротниковый и ясенниково-папоротниковый. Однако значительное участие берез и осины в древостое объясняется не только антропогенным влиянием, но и близостью местообитаний к верхней границе леса. Из этого же вытекает и разнообразие папоротниковых типов, что характерно для пояса темнохвойных горных лесов с его осадками предвосхождения и повышенной влажностью приземного слоя воздуха. Наличие в лесном покрове национального парка сосняков с пихтой

вейниково-зеленомошного и лещиново-разнотравного подтверждает, что леса Карачаево-Черкесии представляют собой зону плавного перехода хвойных лесов Западного Кавказа к хвойным лесам Центрального Кавказа, характеризующегося более континентальным климатом.

Флористическое разнообразие напочвенного покрова в выделенных сообществах высокое, за исключением средне- и высокосомкнутых участков пихтарников ясенниково-кисличных и кисличных, сосняков вейниково-зеленомошных, пихтарников вейниковых, где из-за недостаточной инсоляции или доминирования *Calamagrostis arundinacea* в травяном ярусе отмечено низкое видовое богатство.

Леса с участием пихты Нордманна Тебердинского национального парка являются резерватом ценного генофонда растений, выполняют важнейшие экологические и рекреационные функции, поэтому их сохранение является необходимой задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бебия С.М. Пихтовые леса Кавказа. М.: Московск. гос. ун-т, 2002. 237 с.
Bebiya S.M. *Fir Forests of the Caucasus*. Moscow, Moscow State University Publ., 2002. 237 p. (In Russ.).
2. Белоновская Е.А., Морозова О.В. Типификация и коррекция синтаксонов лесной растительности Западного Кавказа // Разнообразие растительного мира. 2021. № 3(10). С. 28–36.
Belonovskaya E.A., Morozova O.V. Typification and Correction of Forest Vegetation Syntaxa of the Western Caucasus. *Raznoobrazie rastitel'nogo mira* = Diversity of Plant World, 2021, no. 3(10), pp. 28–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.22281/2686-9713-2021-3-28-36>
3. Галушко А.И. Флора Северного Кавказа. Определитель: в 3 т. Ростов-на-Дону, 1978. Т. 1. 320 с., 1980. Т. 2. 359 с., 1980. Т. 3. 328 с.
Galushko A.I. *Flora of the North Caucasus. Indicator*: in 3 vols. Rostov-on-Don, 1978, vol. 1. 320 p. 1980, vol. 2. 359 p. 1980, vol. 3. 328 p. (In Russ.).
4. Гераськина А.П., Шевченко Н.Е. Биотопическая приуроченность дождевых червей в малонарушенных лесах Тебердинского биосферного заповедника // Лесоведение. 2018. № 6. С. 464–478.
Geras'kina A.P., Shevchenko N.E. Biotopic Association of Earthworms in Intact Forests of Teberda Nature Reserve. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 6, pp. 464–478. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114818060037>
5. Голгофская К.Ю. Очерк растительности лесного пояса и его классификация // Тр. КГПБЗ. 2003. Вып. 17. С. 173–194.
Golgofskaya K.Yu. Essay on Vegetation of the Forest Belt and its Classification. *Trudy Kavkazskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika*, 2003, iss. 17, pp. 173–194. (In Russ.).
6. Ипатов В.С. Описание фитоценоза. Методические рекомендации. СПб, 1998. 93 с.
Ipatov V.S. *Description of Phytocenosis. Methodological Recommendations*. St. Petersburg, 1998. 93 p. (In Russ.).
7. Кононов В.Н. Растительность Тебердинского заповедника // Тр. Теберд. гос. заповедника. Ставрополь, 1957. Т. 1. С. 85–112.
Kononov V.N. Vegetation of the Teberda Nature Reserve. *Trudy Teberdinskogo gosudarstvennogo zapovednika*. Stavropol, 1957, vol. 1, pp. 85–112. (In Russ.).
8. Лебедева Н.В., Кривоуцкий Д.А., Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М., Смуров А.В., Максимов В.Н., Тикунов В.С., Огуреева Г.Н., Котова Т.В. География и мониторинг биоразнообразия. М.: Науч. и учеб.-методич. центр, 2002. 432 с.

Lebedeva N.V., Krivolutskij D.A., Puzachenko Yu.G., D'yakonov K.N., Aleshchenko G.M., Smurov A.V., Maksimov V.N., Tikunov V.S., Ogureeva G.N., Kotova T.V. *Geography and Monitoring of Biodiversity*. Moscow, Scientific and Educational Center Publ., 2002. 432 p. (In Russ.).

9. *Онищенко В.В.* Динамика древесного полога пихтовых фитоценозов Тебердинского биосферного заповедника // Изв. вузов. Сев.-Кавказск. регион. Естеств. науки. 2005. № 2. 2005. С. 83–89.

Onishchenko V.V. Dynamics of tree canopy of fir phytocoenoses of Teberda Biosphere Reserve. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennyye nauki* = Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences, 2005, no. 2, pp. 83–89. (In Russ.).

10. *Онищенко В.В., Байчорова Э.М.* Влияние качества воздушной среды на хвойные леса Тебердинского заповедника // Изв. Дагестанск. гос. педагогич. ун-та. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12, № 4. С. 69–78.

Onishchenko V.V., Baychorova E.M. Influence of Air Quality on the Coniferous Forests of Teberdinskiy Reserve. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennyye i tochnye nauki* = Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 69–78. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31161/1995-0675-2018-12-4-69-78>

11. *Онищенко В.В., Дега Н.С., Бостанова Ф.Х.* Современное состояние горного климата Карачаево-Черкесской республики // Междунар. журн. гуманитар. и естеств. наук. 2019. № 1. С. 29–35.

Onishchenko V.V., Dega N.S., Bostanova F.H. The Current State of Mountain Climate of the Karachay-Cherkess Republic. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* = International Journal of Humanities and Natural Sciences, 2019, no. 1, pp. 29–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2018-10414>

12. *Орлов А.Я.* Темнохвойные леса Северного Кавказа. М.: АН СССР, 1954. 256 с.
Orlov A.Ya. *Dark Coniferous Forests of the North Caucasus*. USSR Academy of Sciences Publ., 1954. 256 p. (In Russ.).

13. *Пукинская М.Ю.* Возобновление темнохвойных пород в очагах усыхания *Picea orientalis* (Pinaceae) в Тебердинском заповеднике (Западный Кавказ) // Ботан. журн. 2021. Т. 106, № 12. С. 1167–1179.

Pukinskaya M.Yu. Regeneration of Dark Coniferous Species in the Groups of *Picea orientalis* (Pinaceae) Drying in the Teberda Nature Reserve (Western Caucasus). *Botanicheskij zhurnal*, 2021, vol. 106, no. 12, pp. 1167–1179. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S0006813621120073>

14. *Пукинская М.Ю., Кессель Д.С., Шукина К.В.* Усыхание пихто-ельников Тебердинского заповедника // Ботан. журн. 2019. Т. 104, № 3. С. 3–28.

Pukinskaya M.Yu., Kessel D.S., Shchukina K.V. Drying of Fir-Spruce Forests of the Teberda Nature Reserve. *Botanicheskij zhurnal*, 2019, vol. 104, no. 3, pp. 3–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0006813619030062>

15. *Семкин Б.И.* Теоретико-графовые методы в сравнительной флористике // Теоретические и методические проблемы сравнительной флористики. Л., 1987. С. 149–163.

Semkin B.I. Graph-Theoretic Methods in Comparative Floristics. *Teoreticheskie i metodicheskie problemy sravnitel'noj floristiki*. Leningrad, 1987, pp. 149–163. (In Russ.).

16. *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, USSR Academy of Sciences Publ., 1961. 144 p. (In Russ.).

17. *Тумаджанов И.И.* Лесная растительность долины Теберды в свете послеледниковой истории развития фитоценозов // Тр. Тбилисск. ботан. ин-та. Тбилиси, 1947. Т. 11. С. 1–106.

Tumadzhyanov I.I. Forest Vegetation of the Teberda Valley in View of the Postglacial History of Phytolandscape Development. *Trudy Tbilisskogo botanicheskogo instituta*, 1947, vol. 11, pp. 1–106. (In Russ.).

18. Французов А.А. Флористическая классификация лесов с *Fagus orientalis* Lipsky и *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach в бассейне реки Белой (Западный Кавказ) // Растительность России. 2006. № 9. С. 76–85.

Frantsuzov A.A. Floristic Classification of Forests with *Fagus orientalis* Lipsky and *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach in the Belaya River Basin (Western Caucasus). *Rastitel'nost' Rossii* = Vegetation of Russia, 2006, no. 9, pp. 76–85. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31111/vegrus/2006.09.76>

19. Çoban S., Bonari G. Numerical Classification and Syntaxonomy of Turkish Fir Forests. *Abies 2019: Prospects for Fir Management in a Changeable Environment*. Poland, Kraków, 2019, p. 12.

20. Ermakov N.B., Plugatar Yu.V., Leiba V.D. *Abies nordmanniana* and *Picea orientalis* Forests from the Colchic Region (Western Caucasus) and New Concept of Euxine Dark Coniferous Forests Classification in the Braun-Blanquet System. *Botanica Pacifica: A Journal of Plant Science and Conservation*, 2022, vol. 11, no. 2, pp. 45–55.

<https://doi.org/10.17581/bp.2022.11210>

21. Ewald J., Jehl H., Braun L., Lohberger E. Die Vegetation des Nationalparks Bayerischer Wald als Ausdruck von Standort und Walddynamik. *Tuexenia*, 2011, vol. 31, pp. 9–38. (In Germ.).

22. Garces J.J.C., Bayron Z.N.J., Español J.M.J., Marfa A.C.R., Picardal J.P. Floral Distribution and Diversity of Alien and Native Plants in Cebu Memorial Park, Cebu City, Philippines. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 308–320. <http://dx.doi.org/10.15294/biosaintifika.v14i3.38860>

23. Kara F. Climate-Growth Relationships in Managed and Unmanaged Kazdağı Fir Forests. *Forestist*, 2022, vol. 72, iss. 1, pp. 81–87. <https://doi.org/10.5152/forestist.2021.20050>

24. Masayi N., Mugatsia T., Omondi P. Land Use Changes and Floral Diversity in Kenya's Mt. Elgon Forest Ecosystem. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 2021, vol. 24, no 3, art. no. 89. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3452>

25. Peet R.K. The Measurement of Species Diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1974, no. 5(1), pp. 285–307.

26. Pshegusov R., Tembotova F., Chadaeva V., Sablirova Y., Mollaeva M., Akhomgotov A. Ecological Niche Modeling of the Main Forest-Forming Species in the Caucasus. *Forest Ecosystems*, 2022, vol. 9, art. no. 100019. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100019>

27. Sablirova Yu., Tembotova F., Pshegusov R. Characteristics of Coniferous and Mixed Forest Types in the Basins of Belaya and Malaya Laba Rivers (North-Western Caucasus). *BIO Web of Conferences*, 2021, vol. 35, art. no. 00020.

<https://doi.org/10.1051/bioconf/20213500020>

28. Seliger A., Ammer C., Kreft H., Zerbe S. Changes of Vegetation in Coniferous Monocultures in the Context of Conversion to Mixed Forests in 30 Years – Implications for Biodiversity Restoration. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 343, art. no. 118199. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118199>

29. *The World Flora Online*. Available at: <http://www.worldfloraonline.org> (accessed 25.05.23).

30. Zhang Y., Chen H.Y.H., Reich P.B. Forest Productivity Increases with Evenness, Species Richness and Trait Variation: A Global Meta-Analysis. *Journal of Ecology*, 2012, vol. 100, iss. 3, pp. 742–749. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01944.x>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article



Научная статья

УДК 631.3.072.31

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-130-142

Методика расчета и результаты оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора при агрегатировании с лесными почвообрабатывающими орудиями

В.И. Посметьев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

М.А. Савинков, аспирант; ResearcherID: [LPQ-1007-2024](https://orcid.org/0009-0004-6331-8136),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

В.В. Посметьев, канд. физ.-мат. наук, доц.; ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

А.Ю. Мануковский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

В.О. Никонов[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, savinkov99max03@mail.ru, victorvpo@mail.ru, mayu1964@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 22.11.24 / Одобрена после рецензирования 21.02.25 / Принята к печати 24.02.25

Аннотация. Рассмотрены недостатки современных лесных почвообрабатывающих орудий. Приведены перспективные направления исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, позволяющие повысить эффективность работы тракторов, агрегируемых навесным технологическим оборудованием. Обоснована актуальность разработки для лесных почвообрабатывающих орудий систем рекуперации энергии рабочей жидкости, обеспечивающих снижение на 20–30 % суммарных энергозатрат при выполнении лесохозяйственных работ на примере тракторов тягового класса 20 кН, широко используемых в настоящее время. Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы трактора, позволяющая сократить расход топлива машинно-тракторным агрегатом за счет рекуперации энергии рабочей жидкости, снизить динамические нагрузки, действующие на навесное орудие и трактор, повысить производительность и надежность трактора, улучшить качество обработки почвы на лесных объектах, а также сделать более удобным управление навесным орудием. Цель исследования – получение аналитических выражений изменения изучаемых конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора, обеспечивающих оптимальные значения ее эффективности. Приведена методика расчета показателей эффективности и двухфакторной оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора. На основе компьютерных экспериментов получены аналитические выражения для описываемых функций, по этим выражениям построены графики и картограммы влияния основных конструктивных параметров навесной системы на эффективность ее работы. Установлено, что для рекуперативной навесной

© Посметьев В.И., Савинков М.А., Посметьев В.В., Мануковский А.Ю., Никонов В.О., 2025

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

системы трактора оптимальная длина рычагов составляет 0,33...0,36 м, а оптимальный диаметр гидроцилиндра – 62...66 мм. При этом средняя рекуперлируемая мощность при обработке неровной поверхности без препятствий равняется не менее 0,9 кВт; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения 100 мм не превышает 20 мм; максимальная сила, испытываемая дисковой батареей при контакте с неперерезаемым препятствием, не превышает 11 кН, длина огреха обработки почвы после схода с пня высотой 0,2 м – не более 0,6 м.

Ключевые слова: конструктивные параметры, навесная система, энергоэффективность, оптимизация, рекуперлируемая мощность, трактор, лесные ресурсы, факторное пространство, имитационное моделирование, лесовосстановление

Для цитирования: Посметьев В.И., Савинков М.А., Посметьев В.В., Мануковский А.Ю., Никонов В.О. Методика расчета и результаты оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора при агрегатировании с лесными почвообрабатывающими орудиями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 130–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-130-142>

Original article

Calculation Methodology and Results of Optimization of Design Parameters of the Tractor Recuperative Mounted System When Aggregated with Forest Tillage Implements

Valeryi I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Maksim A. Savinkov, Postgraduate Student; ResearcherID: [LPQ-1007-2024](https://orcid.org/0009-0004-6331-8136), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.; ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Andrey Yu. Manukovskii, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

Vadim O. Nikonov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; posmetyev@mail.ru, savinkov99max03@mail.ru, victorvpo@mail.ru, mayu1964@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉]

Received on November 22, 2024 / Approved after reviewing on February 21, 2025 / Accepted on February 24, 2025

Abstract. The article considers the disadvantages of modern forest tillage implements. Promising areas of research conducted by Russian and foreign scientists are presented, which make it possible to increase the efficiency of tractors aggregated with mounted technological equipment. The relevance of developing working fluid energy recovery systems for forest tillage implements, ensuring a 20–30 % reduction in total energy consumption during forestry operations, is substantiated using the example of 20 kN traction class tractors, which are widely used at present. A promising design of a tractor recuperative mounted system is proposed, which makes it possible to reduce fuel consumption by a machine-tractor unit due to energy recovery of the working fluid, reduce dynamic loads acting on the mounted implement and the tractor, increase the productivity and reliability of the tractor, improve the quality of tillage

at forest sites, and make it more convenient to operate the mounted implement. The aim of the study has been to obtain analytical expressions for changes in the studied design parameters of the tractor recuperative mounted system, ensuring optimal values of its efficiency. A methodology for calculating the efficiency indicators and two-factor optimization of the design parameters of the tractor recuperative mounted system is presented. Based on computer experiments, analytical expressions have been obtained for the described functions, and graphs and cartograms of the influence of the main design parameters of the mounted system on the efficiency of its operation have been constructed using these expressions. It has been established that for the tractor recuperative mounted system, the optimal length of the levers is 0.33... 0.36 m, and the optimal design of the hydraulic cylinder is 62...66 mm. In this case, the average recuperated power when processing an uneven surface without obstacles is at least 0.9 kW; the average deviation of the tillage depth from the target value of 100 mm does not exceed 20 mm; the maximum force experienced by the disk battery when in contact with an uncuttable obstacle does not exceed 11 kN, and the length of the tillage defect after leaving a stump 0.2 m high does not exceed 0.6 m.

Keywords: design parameters, mounted system, energy efficiency, optimization, recuperated power, tractor, forest resources, factor space, simulation modeling, reforestation

For citation: Posmetyev V.I., Savinkov M.A., Posmetyev V.V., Manukovskii A.Yu., Nikonov V.O. Calculation Methodology and Results of Optimization of Design Parameters of the Tractor Recuperative Mounted System When Aggregated with Forest Tillage Implements. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 130–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-130-142>

Введение

Значительные ежегодные потери лесных ресурсов в результате пожаров, от воздействия вредителей и болезней, а также от других факторов сопровождаются существенным возрастанием расходов на охрану, защиту и воспроизводство лесов. К основным видам работ, осуществляемых в процессе лесовосстановления, относят подготовительные операции, первичную обработку и последующие многократные уходы за почвой в междурядьях лесных культур. Своевременное и качественное проведение рассматриваемых видов работ в условиях вырубок, гарей, склонов, косогоров, рекультивируемых земель и оврагов невозможно без применения специализированных почвообрабатывающих агрегатов. В процессе лесовосстановления задействовано большое количество разнообразных по назначению, а также по технико-эксплуатационным характеристикам лесных почвообрабатывающих орудий. Несмотря на это, их использование на вырубках все еще не в полной мере соответствует основным требованиям эффективности. Современные лесные почвообрабатывающие орудия обладают низкими показателями энергосбережения. Причиной являются значительные энергетические потери при холостых движениях массивных деталей и узлов данных орудий, такие потери достигают до 30 % [5].

Анализ результатов исследований, выполненных российскими и зарубежными учеными, показывает, что повышение эффективности тракторов, агрегируемых навесным технологическим оборудованием, можно достичь за счет применения: интеллектуального алгоритма управления и многопараметрического метода регулировки глубины обработки почвы; оптимального соотношения скорости движения трактора и глубины обработки почвы в зависимости от характеристики ее влажности; управления давлением рабочей жидкости в

гидроцилиндре навесной системы трактора в зависимости от глубины обработки почвы; интеллектуальных систем дистанционного мониторинга, фиксирующих в режиме реального времени параметры неровностей обрабатываемой почвы и принимающих на этой основе решения об изменении углов поворота рычагов навесной системы, корректирующих через гидравлическую систему глубину обработки почвы; активного управления демпфированием нагрузок между трактором и гидравлическими задними сцепками; усовершенствованных конструкций 3-точечных сцепок [7–20].

Одним из перспективных направлений, позволяющих снизить на 20–30 % суммарные энергозатраты при выполнении лесохозяйственных работ, является разработка для лесных почвообрабатывающих орудий систем рекуперации энергии рабочей жидкости. Многолетний опыт ученых в области конструирования рекуперативных систем и устройств для транспортно-технологических и лесных машин позволил предложить перспективную конструкцию рекуперативной навесной системы трактора (рис. 1). Такая конструкция дает возможность сократить расход топлива машинно-тракторным агрегатом за счет рекуперации энергии рабочей жидкости, динамические нагрузки, действующие на навесное орудие и трактор, повысить производительность и надежность трактора, качество обработки почвы на лесных объектах, а также удобство управления навесным орудием [4, 6].

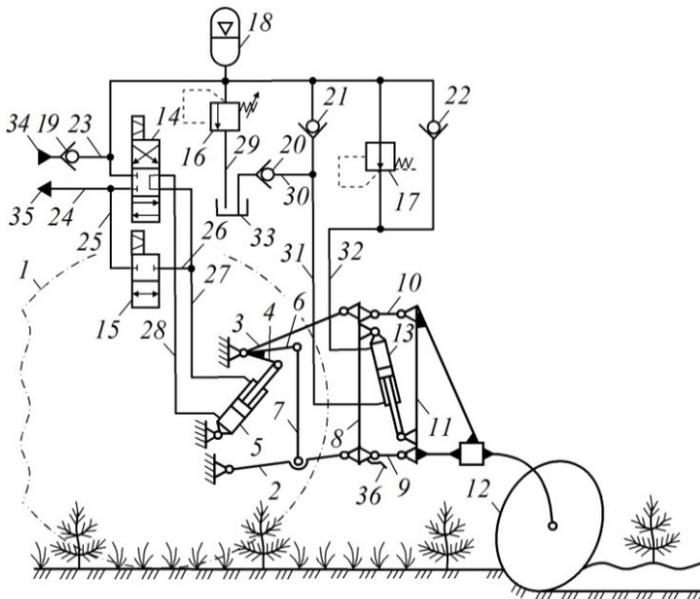


Рис. 1. Рекуперативная навесная система трактора: 1 – трактор; 2, 3 – тяги; 4, 6, 9, 10 – рычаги; 5, 13 – гидроцилиндры; 7 – раскосы; 8 – треугольная ферма; 11 – рама; 12 – дисковые рабочие органы; 14, 15 – гидрораспределители; 16, 17 – регулируемый предохранительный и редуцирующий клапаны; 18 – пневмогидравлический аккумулятор; 19–22 – обратные клапаны; 23–32 – трубопроводы; 33 – гидробак; 34, 35 – напорный и сливной порты

Fig. 1. The recuperative mounted system of the tractor: 1 – tractor; 2, 3 – rods; 4, 6, 9, 10 – levers; 5, 13 – hydraulic cylinders; 7 – diagonals; 8 – triangular truss; 11 – frame; 12 – disk operative parts; 14, 15 – hydraulic distributors; 16, 17 – adjustable safety and pressure-reducing valves; 18 – pneumohydraulic accumulator; 19–22 – check valves; 23–32 – pipelines; 33 – hydraulic tank; 34, 35 – pressure and drain ports

Целью исследования является получение аналитических выражений изменения конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора для обеспечения ее оптимальной эффективности.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является рекуперативная навесная система трактора. Предметом – конструктивные параметры рекуперативной навесной системы трактора, обеспечивающие максимальную рекуперированную навесной системой мощность N_p , а также минимальное среднее отклонение глубины Δa обработки от целевого значения a , силы F_m взаимодействия дисковой батареи с неперерезаемым препятствием в виде пня и огреха L_o обработки почвы после схода орудия с неперерезаемого препятствия в виде пня. Для изучения влияния длины L_p нижних и верхних рычагов навесного устройства и диаметра D_r гидроцилиндра навесного устройства орудия на изменение показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора разработаны математическая модель и реализующая ее компьютерная программа [1–3].

Для обоснования конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора решена 2-факторная задача оптимизации. В качестве факторов оптимизации выбраны 2 основных конструктивных параметра рекуперативной навесной системы: длина нижних и верхних рычагов навесного устройства; диаметр гидроцилиндра навесного устройства орудия. Критериями оптимизации выступают 4 показателя эффективности рекуперативной навесной системы: средняя рекуперированная мощность; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения a ; максимальная сила взаимодействия дискового орудия с неперерезаемым препятствием в виде пня; огрех обработки почвы после схода орудия с неперерезаемого препятствия в виде пня.

Для определения показателей эффективности N_p и Δa проводили компьютерные эксперименты по обработке почвы со случайным неровным рельефом поверхности и отсутствием неперерезаемых препятствий (рис. 2).

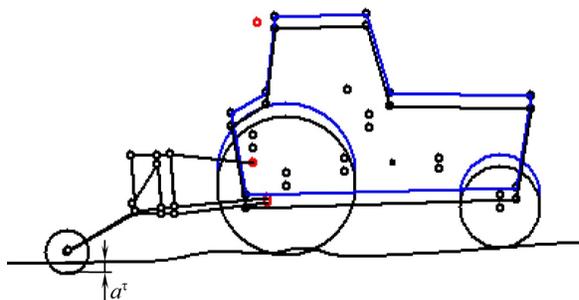
Средняя рекуперированная мощность устанавливалась по формуле:

$$N_p = \frac{\Delta t}{\tau_2 - \tau_1} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} P_{\text{пга}0} Q_{\text{пга}}^{\tau},$$

где Δt – шаг интегрирования по времени дифференциальных уравнений; τ_1 и τ_2 – номера шагов интегрирования, соответствующие началу и концу интервала наблюдения; $P_{\text{пга}0}$ – давление начала зарядки незаряженного пневмогидравлического аккумулятора; $Q_{\text{пга}}^{\tau}$ – поступление (расход) рабочей жидкости в полость пневмогидравлического аккумулятора на шаге интегрирования τ .

Рис. 2. Текущее заглубление a^{τ} 1 из 2 дисковых батарей на шаге интегрирования τ

Fig. 2. The current depth value a^{τ} of 1 of the 2 disk batteries at the integration step τ



Среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения $a = 10$ см определялось по формуле:

$$\Delta a = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} |a^\tau - a|.$$

Для установления показателей эффективности F_m и L_o проводили компьютерные эксперименты с моделированием движения агрегата по ровной поверхности почвы и одним неперерезаемым препятствием в виде пня.

Максимальная сила взаимодействия дисковой батареи с модельным пнем определялась следующим образом:

$$F_m = \max_{\tau=\tau_1 \dots \tau_2} \sum_{i=1}^{N_\tau} F_{i\tau}^C, \quad (1)$$

где i и N_τ – номер точки и общее количество точек дискретизации опорной поверхности соответственно; $F_{i\tau}^C$ – сила, действующая на ось C дисковой батареи со стороны опорной поверхности с неперерезаемым препятствием в виде пня со стороны i -й точки поверхности на шаге интегрирования τ .

Огрех L_o определялся расстоянием вдоль оси OX между правой границей модельного пня $x_{п2}$ и ближайшей точкой x_3 , в которой заглубление орудия достигло целевого значения a (рис. 3):

$$L_o = x_C (y_C = y_{\text{почв}} - a + R) - x_{п2}, \quad (2)$$

где x_C и y_C – продольная и вертикальная координаты оси дисковой батареи соответственно; $y_{\text{почв}}$ – вертикальная координата уровня почвы; R – радиус дисковой батареи.

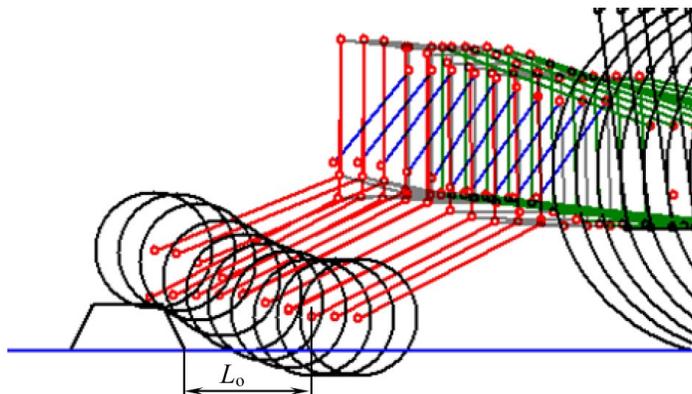


Рис. 3. Определение огреха обработки почвы после схода дисковой батареи с неперерезаемого препятствия

Fig. 3. The determination of the tillage defect after the disk battery has left an uncuttable obstacle

В обоих случаях проводимых компьютерных экспериментов в соответствии с выражениями (1) и (2) гидроцилиндр навесного устройства трактора был заблокирован и копирование рельефа поверхности производилось за счет работы гидроцилиндра навесного устройства орудия.

Задачу оптимизации параметров рекуперативной навесной системы трактора можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} N_p(L_p, D_r) \rightarrow \max; \\ \Delta a(L_p, D_r) \rightarrow \min; \\ F_m(L_p, D_r) \rightarrow \min; \\ L_o(L_p, D_r) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow L_p^{\text{опт}}, D_r^{\text{опт}},$$

где $L_p^{\text{опт}}$ и $D_r^{\text{опт}}$ – оптимальные значения параметров L_p и D_r соответственно.

Задача оптимизации считается решенной, если определена область в факторном пространстве (L_p, D_r) , в которой одновременно будет максимальным критерий N_p и минимальными критерии $\Delta a, F_m, L_o$.

Для оптимизации параметров рекуперативной навесной системы трактора проведены 2 серии (неровная поверхность без препятствий, ровная поверхность с препятствием) из 9 компьютерных экспериментов, в которых вариировали длину рычагов на уровнях 0,2, 0,3, 0,4 м и диаметр гидроцилиндра навесного устройства орудия на уровнях 60, 70, 80 мм (рис. 4, см. таблицу).

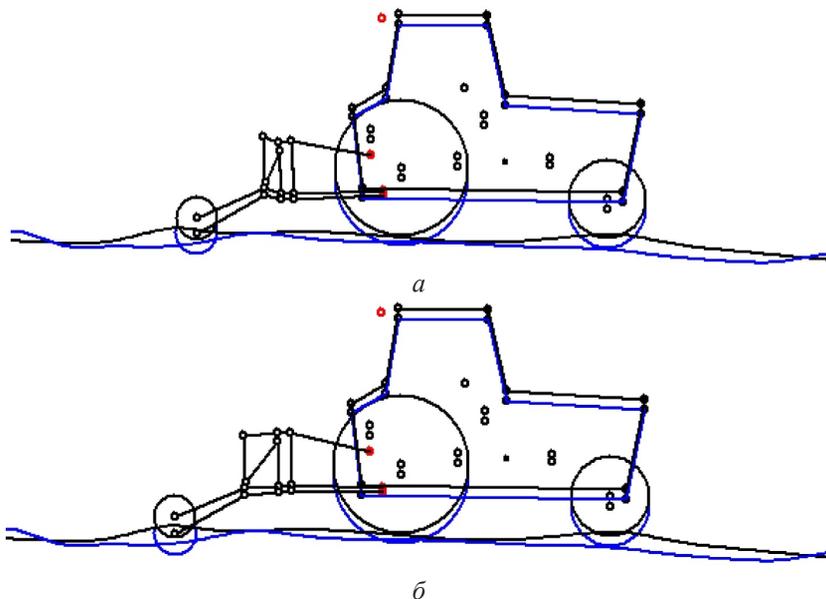


Рис. 4. Варианты рекуперативного навесного устройства с различной длиной нижних и верхних рычагов: a – 0,2 м; b – 0,4 м

Fig. 4. The variants of a recuperative mounted device with different lengths of the lower and upper levers: a – 0.2 m; b – 0.4 m

Результаты оптимизационной серии компьютерных экспериментов The results of the optimization series of computer experiments

Эксперимент	Длина рычагов, м	Диаметр гидроцилиндра, мм	Рекуперированная мощность, кВт	Неравномерность глубины обработки, мм	Максимальная сила, действующая на дисковую батарею, кН	Длина огреха обработки после обработки, м
1	0,2	60	0,65	30	12,1	0,48
2	0,2	70	0,82	34	13,8	0,55
3	0,2	80	0,78	37	17,0	0,66
4	0,3	60	0,70	19	10,2	0,51

Окончание таблицы

Эксперимент	Длина рычагов, м	Диаметр гидроцилиндра, мм	Рекуперированная мощность, кВт	Неравномерность глубины обработки, мм	Максимальная сила, действующая на дисковую батарею, кН	Длина огреха обработки после пня, м
5	0,3	70	0,91	21	12,2	0,60
6	0,3	80	0,86	24	13,9	0,72
7	0,4	60	0,95	16	9,10	0,63
8	0,4	70	1,17	18	10,5	0,68
9	0,4	80	1,10	21	11,7	0,78

На основе данных компьютерных экспериментов определены аналитические выражения для функций $N_p(L_p, D_r)$, $\Delta a(L_p, D_r)$, $F_m(L_p, D_r)$, $L_o(L_p, D_r)$. Аналитические выражения получали в виде многочленов 2-го порядка, которые позволяют не только интерполировать результаты эксперимента, но и сгладить случайный разброс, а также более четко выделить экстремальные области функции:

$$K(L_p, D_r) = k_1 L_p^2 + k_2 D_r^2 + k_3 L_p D_r + k_4 L_p + k_5 D_r + k_6,$$

где K – критерий оптимизации ($N_p/\Delta a/F_m/L_o$); $k_1 \dots k_6$ – параметры полинома.

Параметры полиномов установлены методом наименьших квадратов, в рамках которого минимизировалась сумма квадратов отклонений аналитической зависимости от результатов компьютерного эксперимента:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{кэ}}} \left(K_{\text{аналит}}(L_p^i, D_r^i) - K_{\text{кэ}}^i(L_p^i, D_r^i) \right)^2 \rightarrow \min,$$

где i и $N_{\text{кэ}}$ – порядковый номер и общее количество компьютерных экспериментов, $N_{\text{кэ}} = 9$; $K_{\text{аналит}}$ – искомая аналитическая (полиномиальная) зависимость критерия K от факторов L_p и D_r ; $K_{\text{кэ}}^i$ – значения критерия K , определенные в i -м компьютерном эксперименте с параметрами L_p^i и D_r^i . В результате получены следующие аналитические формулы для показателей рекуперативной навесной системы трактора:

$$N_p(L_p, D_r) = 8,833L_p^2 - 1,267 \cdot 10^{-3} \cdot D_r^2 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot L_p D_r - 4,033L_p + 0,183D_r - 5,397;$$

$$\Delta a(L_p, D_r) = 466,7L_p^2 + 1,667 \cdot 10^{-3} \cdot D_r^2 - 0,5L_p D_r - 321,7L_p + 0,2D_r + 64,06;$$

$$F_m(L_p, D_r) = 26,67L_p^2 + 1,667 \cdot 10^{-3} \cdot D_r^2 - 0,575L_p D_r + 4,917L_p + 0,126D_r + 3,214;$$

$$L_o(L_p, D_r) = 2L_p^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot D_r^2 - 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot L_p D_r - 8,333 \cdot 10^{-3} \cdot L_p - 0,017D_r + 0,769.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа функций $N_p(L_p, D_r)$, $\Delta a(L_p, D_r)$, $F_m(L_p, D_r)$, $L_o(L_p, D_r)$ построены графики и картограммы. Графики (рис. 5) позволяют визуально выявить тенденции влияния параметров рекуперативной навесной системы трактора на показатели его эффективности. Картограммы оптимизации дают возможность графоаналитическим методом определить эффективность рекуперативной навесной системы трактора. На рис. 6, *a* приведен пример использования картограммы. Допустим, длина рычагов навесного устройства составляет 0,3 м (точка *A*) и диаметр гидроцилиндра – 70 мм (точка *B*). Проводим перпендикуляры к координатным осям и находим их точку пересечения *C*. Точка *C* лежит между линиями уровня 0,9 и 1 кВт, однако ближе к линии уровня 0,9 кВт. Поэтому рекуперлируемая мощность составляет 0,91 кВт. Аналогично графоаналитическим способом определяются показатели Δa , F_m , L_o .

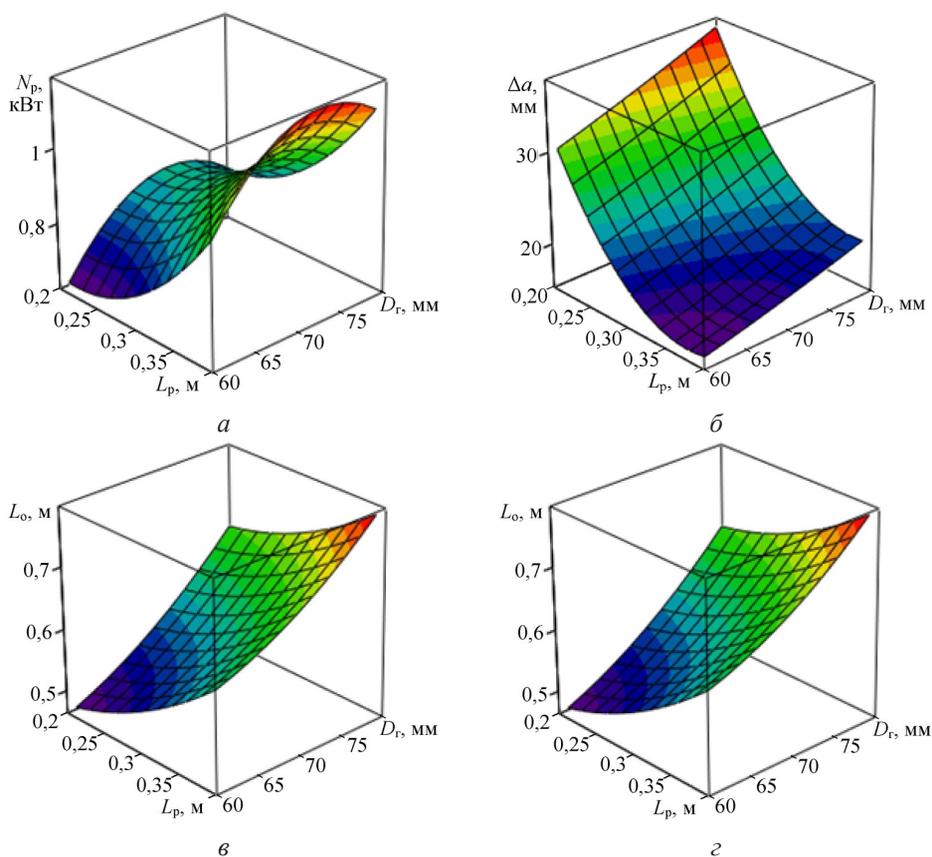


Рис. 5. Графики влияния длины рычагов и диаметра гидроцилиндра навесного устройства орудия: *a* – на рекуперлируемую мощность; *б* – на неравномерность обработки; *в* – на максимальную силу, действующую на дисковую батарею; *з* – на длину огреха за препятствием

Fig. 5. The graphs of the influence of the lever length and the hydraulic cylinder diameter of the implement's mounted device: *a* – on the recuperated power; *б* – on the unevenness of processing; *в* – on the maximum force acting on the disk battery; *з* – on the length of the defect behind the obstacle

На каждой из 4 картограмм рис. 6 можно выделить благоприятную область факторного пространства (L_p, D_r) , в которой соответствующий критерий

имеет наилучшие значения. В качестве линий уровня, разграничивающих благоприятные и неблагоприятные области, выбраны следующие: $N_p = 0,9$ кВт, $\Delta a = 20$ мм, $F_M = 11$ кН, $L_o = 0,6$ м. Пересечение 4 благоприятных областей формирует общую оптимальную область (выделена черным цветом на рис. 7). По расположению оптимальной области в факторном пространстве можно сделать вывод, что наилучшая длина рычагов составляет $0,33...0,36$ м, а оптимальный диаметр гидроцилиндра – $62...66$ мм.

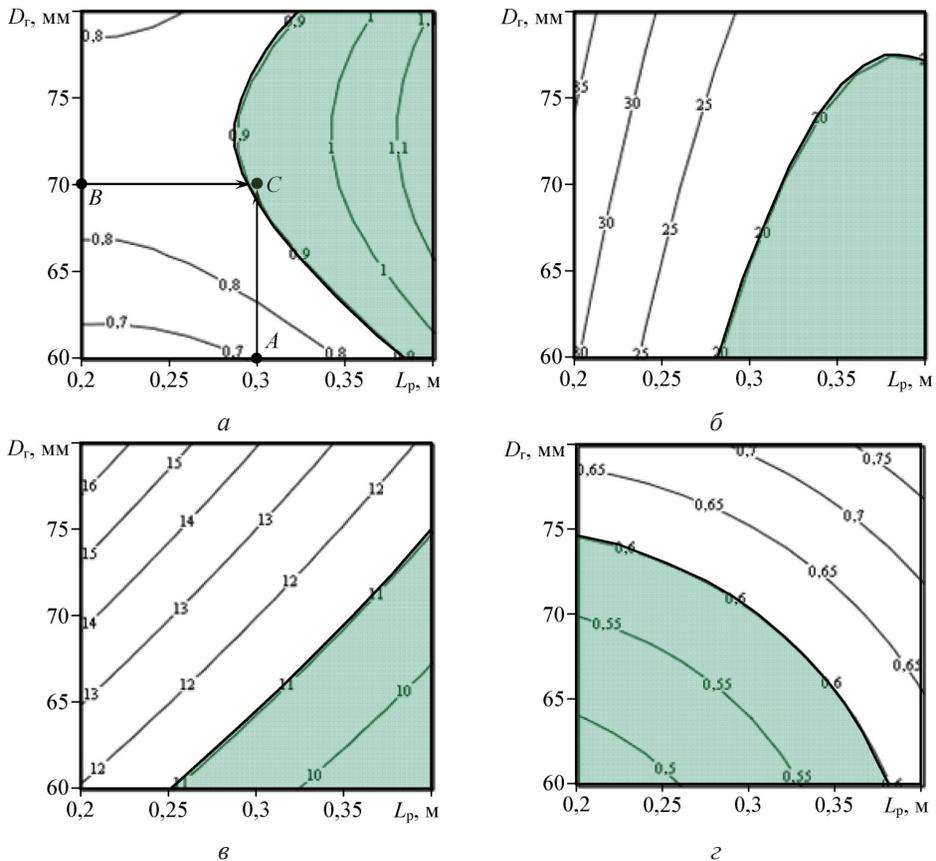
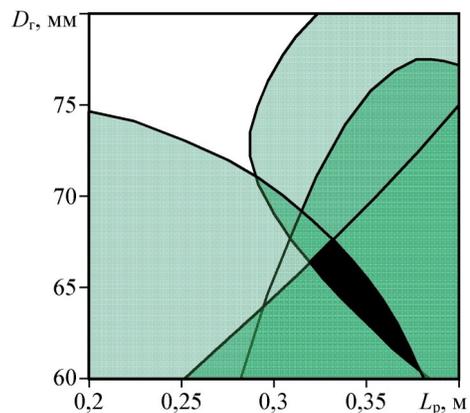


Рис. 6. Картограммы оптимизации параметров рекуперативного навесного устройства трактора: а – $N_p(L_p, D_r)$, кВт; б – $\Delta a(L_p, D_r)$, мм; в – $F_M(L_p, D_r)$, кН; з – $L_o(L_p, D_r)$, мм

Fig. 6. The cartograms of optimization of parameters of the tractor recuperative mounted device: а – $N_p(L_p, D_r)$, kW; б – $\Delta a(L_p, D_r)$, mm; в – $F_M(L_p, D_r)$, kN; з – $L_o(L_p, D_r)$, mm

Рис. 7. Оптимальная область факторного пространства

Fig. 7. The optimal area of the factor space



При этом средняя рекуперлируемая мощность при обработке неровной поверхности без препятствий равняется не менее 0,9 кВт; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения 100 мм не превышает 20 мм; максимальная сила, испытываемая дисковой батареей при контакте с непорезаемым препятствием не выходит за пределы значения 11 кН, огрех обработки почвы после схода с пня высотой 0,2 м – не более 0,6 м.

Выводы

1. Одним из перспективных направлений, позволяющих снизить на 20–30 % суммарные энергозатраты при выполнении лесохозяйственных работ, является разработка для их конструкций систем рекуперации энергии рабочей жидкости. Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы трактора, использование которой способствует сокращению расхода топлива машинно-тракторным агрегатом за счет рекуперации энергии рабочей жидкости, динамических нагрузок, действующих на навесное орудие и трактор, повышению производительности и надежности трактора, улучшению качества обработки почвы на лесных объектах, а также удобства управления навесным орудием.

2. Приведена методика расчета показателей эффективности и оптимизации параметров рекуперативной навесной системы трактора. На основе компьютерных экспериментов получены аналитические выражения для исследуемых функций, позволившие построить графики и картограммы влияния основных конструктивных параметров навесной системы на показатели эффективности ее работы.

3. Установлено, что оптимальная длина рычагов рекуперативной навесной системы трактора составляет 0,33...0,36 м, а оптимальный диаметр гидроцилиндра – 62...66 мм. При этом средняя рекуперлируемая мощность при обработке неровной поверхности без препятствий равняется не менее 0,9 кВт; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения 100 мм не превышает 20 мм; максимальная сила, испытываемая дисковой батареей при контакте с непорезаемым препятствием, – не более 11 кН, огрех обработки почвы после схода с пня высотой 0,2 м – не больше 0,6 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 279 с.

Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. *Planning an Experiment When Searching for Optimal Conditions*: 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).

2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.

Granovskij V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data during Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. (Leningrad Branch), 1990. 288 p. (In Russ.).

3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 270 с.

Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Basic, Fortran and Pascal Languages*. Tomsk, Rasko Publ., 1991. 270 p. (In Russ.).

4. Патент 2830434 РФ МПК А01В 63/10. Навесная система трактора: № 2023136342: заявл. 30.12.2023: опубл. 19.11.2024 / В.И. Посметьев, М.А. Савинков, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, Е.В. Снятков.

Posmetyev V.I., Savinkov M.A., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Snyatkov E.V. *Tractor Mounted System*. Patent RF, no. RU 2830434 C1, 2024. (In Russ.).

5. Посметьев В.И., Зеликов В.А. Состояние и пути повышения эффективности почвообрабатывающих агрегатов при лесовосстановлении на вырубках. Воронеж: ВГЛТУ, 2015. 236 с.

Posmetyev V.I., Zelikov V.A. *Status and Ways to Improve the Efficiency of Tillage Units in Reforestation in Clearings*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2015. 236 p. (In Russ.).

6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Савинков М.А., Снятков Е.В. Перспективы разработки рекуперативного навесного механизма трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями // Проблемы эксплуатации и перспективы развития автомобильного транспорта: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2023. С. 101–111.

Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Savinkov M.A., Snyatkov E.V. Prospects for the Development of a Recuperative Mounted Mechanism for a Tractor with a Device for its Aggregation with Forest Disk Tools. *Problems of Operation and Development Prospects of Automobile Transport: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2023, pp. 101–111. (In Russ.).

7. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernández-Hernández J.L., Penna A.F., Herrera-Miranda I. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators. *Agriculture*, 2020, vol. 10, no. 5, art. no. 145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>

8. Chukewad Y.M., Chadha S., Jagdale K.S., Elkunchwar N., Rosa U.A., Omohundro Z. Tractor Three-Point Hitch Control for an Independent Lower Arms System. *AgriEngineering*, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 1725–1746. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>

9. Gao Y., Yang Y., Fu S., Feng K., Han X., Hu Y., Zhu Q., Wei X. Analysis of Vibration Characteristics of Tractor-Rotary Cultivator Combination Based on Time Domain and Frequency Domain. *Agriculture*, 2024, vol. 14, no. 7, art. no. 1139. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071139>

10. Khaechanpong Y., Ahamed T., Takigawa T. Design, Fabrication and Performance Evaluation of an Inter-Row Cultivator for Sugarcane Fields. *Inventions*, 2017, vol. 2, no. 3, art. no. 25. <https://doi.org/10.3390/inventions2030025>

11. Kim Y-S., Kim W-S., Baek S-Y., Baek S-M., Kim Y-J., Lee S-D., Kim Y-J. Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 9, art. no. 2450. <https://doi.org/10.3390/s20092450>

12. Koo Y.M., Kang Y. Characteristics of Power and Fuel Use of a Tractor-Mounted Integrated Implement for Round Ridge Preparation. *Journal of Biosystems Engineering*, 2021, vol. 46, pp. 496–507. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00122-w>

13. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Mao E. A Vibration Reduction Control Method for Tractor Rear Hydraulic Hitch Based on Pressure Feedback. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 8, art. no. 1546. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>

14. Luo C., Chen J., Guo S., An X., Yin Y., Wen C., Liu H., Meng Z., Zhao C. Development and Application of a Remote Monitoring System for Agricultural Machinery Operation in Conservation Tillage. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 9, art. no. 1460. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091460>

15. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydrau-

lic Hitch System of Electric Tractors. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 8, art. no. 1555. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>

16. Md-Tahir H., Zhang J., Xia J., Zhou Y., Zhou H., Du J., Sultan M., Mamona H. Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations. *Agronomy*, 2021, vol. 11, no. 1, art. no. 168. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>

17. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. Development Status and Research Progress of a Tractor Electro-Hydraulic Hitch System. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 10, art. no. 1547. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>

18. Sun X., Song Y., Wang Y., Qian J., Lu Z., Wang T. Design and Test of a Tractor Electro-Hydraulic-Suspension Tillage-Depth and Loading-Control System Test Bench. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 10, art. no. 1884. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101884>

19. Xu J., Li R., Li Y., Zhang Y., Sun H., Ding X., Ma Y. Research on Variable-Universal Fuzzy Control Technology of an Electro-Hydraulic Hitch System. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 11, art. no. 1920. <https://doi.org/10.3390/pr9111920>

20. Zhou M., Xia J., Zhang S., Hu M., Liu Z., Liu G., Luo C. Development of a Depth Control System Based on Variable-Gain Single-Neuron PID for Rotary Burying of Stubbles. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 1, art. no. 30. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010030>

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

Научная статья

УДК 623.437.3.093;629.1.032.001;629.36

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-143-153

Распределение мощности в трансмиссиях лесных и транспортных колесных машин

Р.Ю. Добрецов¹, д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [H-2530-2019](https://orcid.org/0000-0002-3827-0220),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>

С.Б. Добрецова¹, ст. преподаватель; *ResearcherID:* [AEF-4221-2022](https://orcid.org/0000-0002-8509-2105),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8509-2105>

С.А. Войнаш², мл. науч. сотр.; *ResearcherID:* [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

В.А. Соколова³, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; dr-idpo@yandex.ru, sdobretsova@mail.ru

²Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, Россия, 420008; sergeyvoynash@yandex.ru[✉]

³Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия, 191186; sokolova_vika@inbox.ru

Поступила в редакцию 04.02.25 / Одобрена после рецензирования 07.04.25 / Принята к печати 09.04.25

Аннотация. Приведены аргументы в пользу создания управляемых межосевых дифференциалов, адаптированных для эксплуатации в трансмиссиях лесных и транспортных колесных машин, принципы определения их параметров, подходы к проектированию. Предложен путь локализации производства таких механизмов в Российской Федерации. Цель работы – поиск способов повышения тяговых свойств и проходимости машин за счет управления распределением мощности между ведущими мостами. Использовались методы теории движения колесных машин, теории машин и механизмов, подходы к проектированию агрегатов трансмиссий транспортных средств. Концепция управляемого межосевого механизма распределения мощности сформулирована на основе анализа условий работы и особенностей конструкции распространенных в лесозаготовительной промышленности колесных машин. Разработка данного механизма оправдана с точки зрения повышения эффективности распределения мощности и улучшения эксплуатационных характеристик транспортных средств. Предложены принципы определения основных внешних параметров механизма. Рассматриваются подходы к созданию кинематических схем, что важно для понимания процесса передачи движений между элементами механизма. Показано, что кинематический и силовой анализ позволяют оценить влияние механических сил и движений на функционирование устройства. Определены моменты на основных звеньях механизма для обеспечения надежности и эффективности проектирования. Результаты могут быть использованы при конструировании управляемых межосевых механизмов распределения мощности для трансмиссий лесных и транспортных колесных машин. Применение управляемого межосевого дифференциала может повысить эксплуатационные показатели лесных гусеничных машин за счет увеличения полноты использования тягово-сцепных свойств шасси. Предложенным механизмом целесообразно оснащать трансмиссию 4-гусеничной машины (в частности, в случае установки треугольных гусеничных модулей вместо

© Добрецов Р.Ю., Добрецова С.Б., Войнаш С.А., Соколова В.А., 2025

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

ведущих колес изначально колесного трактора). При разработке подобных механизмов следует использовать подходы, апробированные в теории движения колесных и гусеничных машин и методы проектирования узлов трансмиссий транспортных машин. Для максимальной локализации производства управляемых межосевых дифференциалов представляется возможным применять технологии, распространенные в танкостроении. Работа может послужить основой для дальнейшего поиска инженерных решений в области механики и автомобильной техники, открывая новые возможности для улучшения управления распределением мощности в транспортных средствах.

Ключевые слова: симметричный дифференциал, планетарный механизм, опорные реакции, использование сцепного веса, проходимость, управляемость, устойчивость движения

Для цитирования: Добрецов Р.Ю., Добрецова С.Б., Войнаш С.А., Соколова В.А. Распределение мощности в трансмиссиях лесных и транспортных колесных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 143–153.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-143-153>

Original article

Power Distribution in Transmissions of Forestry and Transport Wheeled Vehicles

Roman Yu. Dobretsov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-2530-2019](https://orcid.org/0000-0002-3827-0220),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>

Svetlana B. Dobretsova¹, Senior Lecturer; ResearcherID: [AEF-4221-2022](https://orcid.org/0000-0002-8509-2105),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8509-2105>

Sergey A. Voinash²✉, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

Viktoriya A. Sokolova³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ul. Politekhnikeskaya, 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; dr-idpo@yandex.ru, sdobretsova@mail.ru

²Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya, 18, Kazan, 420008, Russian Federation; sergeyvoinash@yandex.ru✉

³Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Bolshaya Morskaya, 18, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation; sokolova_vika@inbox.ru

Received on February 4, 2025 / Approved after reviewing on April 7, 2025 / Accepted on April 9, 2025

Abstract. The article presents arguments in favor of creating controlled center differentials adapted for use in transmissions of forestry and transport wheeled vehicles, the principles for determining their parameters, and approaches to design. A way to localize the production of such mechanisms in the Russian Federation is proposed. The aim of the work has been to find ways to improve the traction properties and cross-country ability of vehicles by controlling the power distribution between the drive axles. The methods of the theory of motion of wheeled vehicles, the theory of machines and mechanisms, and approaches to the design of vehicle transmission units have been used. The concept of a controlled center-to-center power distribution mechanism has been formulated based on an analysis of the operating conditions and design features of wheeled machines used in the logging industry. The development

of this mechanism has been justified from the point of view of increasing the efficiency of power distribution and improving the performance characteristics of vehicles. The principles for determining the main external parameters of the mechanism have been proposed. The approaches to the creation of kinematic diagrams have been considered, which is important for understanding the process of transferring movements between the elements of the mechanism. It has been shown that kinematic and force analysis makes it possible to evaluate the influence of mechanical forces and movements on the functioning of the device. The points on the main links of the mechanism have been identified to ensure the reliability and efficiency of the design. The results can be used in the design of controlled center-to-center power distribution mechanisms for transmissions of forestry and transport wheeled vehicles. The use of a controlled center differential can improve the performance of forestry tracked vehicles by increasing the full use of traction properties of the chassis. It is advisable to equip the transmission of a 4-tracked vehicle with the proposed mechanism (in particular, in the case of installing triangular tracked modules instead of the driving wheels of an originally wheeled tractor). When developing such mechanisms, it is necessary to apply approaches tested in the theory of motion of wheeled and tracked vehicles and methods for designing transmission assemblies of transport vehicles. To maximize the localization of the production of controlled center differentials, it is possible to use technologies used in tank construction. The work can serve as a basis for further research into engineering solutions in the field of mechanisms and automotive technology, opening up new opportunities for improving the management of power distribution in vehicles.

Keywords: symmetric differential, planetary gear mechanism, supporting reactions, use of coupling weight, cross-country ability, controllability, motion stability

For citation: Dobretsov R.Yu., Dobretsova S.B., Voinash S.A., Sokolova V.A. Power Distribution in Transmissions of Forestry and Transport Wheeled Vehicles. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 143–153. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-143-153>

Введение

Колесные машины широко применяются в лесной промышленности при проведении лесозаготовительных и транспортных работ. Для этой сферы характерно не только создание семейств машин различного назначения на базе колесного шасси, но и большое разнообразие самих базовых шасси. При этом преобладающая часть производителей – это иностранные предприятия (Timberjack, Caterpillar, Ranger, TreeFarmer, John Deere и др.). Обзор и анализ конструктивных особенностей базовых шасси выполнялись на основе источников [2–7, 9, 13]. Номенклатура моделей, эксплуатируемых на предприятиях Северо-Западного региона, подробно представлена, например, в монографии [4].

Несмотря на многообразие моделей, прослеживаются общие тенденции в подходе к компоновке машины, принципам построения ходовой части и трансмиссии, обусловленные назначением агрегата и условиями эксплуатации. Шасси является полноприводным. Для трелевочных тракторов (скиддеров) свойственно наличие 2 ведущих мостов (рис. 1). Для сортиментовозов или форвардеров, харвестеров обычно выбирается 3-осная схема, при этом сзади часто используется балансирная (тандемная) тележка [4].

Обширные статистические данные по условиям эксплуатации [4 и др.] указывают на распространенность лесных колесных машин для тяжелых грунтовых условий, когда целесообразнее было бы использовать гусеничную тех-

нику. Для улучшения сцепных свойств в этих случаях применяют цепи противоскольжения и съемные гусеницы.



Рис. 1. Отечественные лесные колесные машины: слева – колесный трелевочный трактор ЛТ-157; справа – форвардер «Онежец» ШЛК 6-04

Fig. 1. The domestic forestry wheeled vehicles: on the left – LT-157 wheeled skidder; on the right – ShLK-6-04 “Onezhets” forwarder

Актуальной тенденцией современного тракторостроения является установка треугольного гусеничного модуля на место ведущего колеса изначально колесного трактора. Форма модуля позволяет снизить риск попадания грязи и предметов в зацепление, а также исключить соударение ведущего колеса с поверхностью почвогрунта. Для сельскохозяйственных тракторов зарубежные производители выпускают модули на основе резинокордной гусеницы (рис. 2). В Российской Федерации ведутся разработки подобных конструкций. При модернизации сельскохозяйственного трактора основная цель – снижение давления на почву. Для лесных машин более актуально увеличение тягово-сцепных характеристик (поэтому при наличии задней приводной тележки часто используются съемные гусеничные цепи). Двигатель лесной машины взаимодействует с камнями, корнями, порубочными остатками. В связи с этим в конструкции подобного модуля для лесной машины более актуальна звенчатая металлическая гусеница с параллельным резинометаллическим шарниром [8, 20–22, 24].

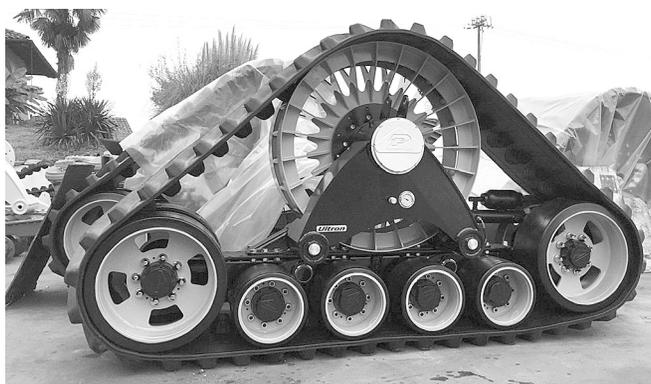


Рис. 2. Треугольный гусеничный модуль [12]

Fig. 2. The triangular tracked module [12]

При установке треугольного гусеничного модуля на заднюю ось 2-осной машины существенно увеличивается максимальная сила тяги по сцеплению с грунтом, которая при передаче на ведущие колеса может обеспечить больший момент за счет переключения режимов работы межосевого управляемого дифференциала. Следует обратить внимание, что установка треугольного гусе-

ничного модуля в общем случае ведет к изменению массы неподрессоренных частей, параметров колебательных процессов, это, в свою очередь, негативно сказывается на ресурсе шасси. Кроме того, изменение высоты центра тяжести влияет на поперечную устойчивость машины.

Цель данного исследования заключается в улучшении тяговых характеристик и проходимости лесных колесных машин посредством регулирования распределения энергии между основными мостами.

Задачи: аргументировать необходимость разработки конструкции управляемого межосевого механизма распределения мощности с использованием симметричного дифференциала; предложить принципы выявления основных внешних характеристик данного механизма и методы разработки его кинематических схем; найти пути кинематического и силового анализа рассматриваемого механизма; указать на апробированные технологии, позволяющие локализовать производство таких механизмов на предприятиях Российской Федерации.

Объектами исследования являются шасси колесных транспортных средств для лесозаготовок, системы трелевки и автопоезда.

Использовались методы теории движения колесных транспортных средств, а также теории машин и механизмов, наряду с подходами к проектированию трансмиссионных агрегатов для транспортных средств.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенностью трансмиссии лесных гусеничных машин является наличие блокируемого межосевого дифференциала (рис. 3). При блокировке дифференциала возникают условия для появления циркуляции мощности между ведущими мостами, что может приводить к разрушению деталей агрегатов трансмиссии (например, зубьев главной передачи), а также ухудшать управляемость и устойчивость машины. Поэтому режим блокировки нужно применять кратковременно, а разработчик техники вынужден выбирать между использованием симметричного или несимметричного дифференциала.

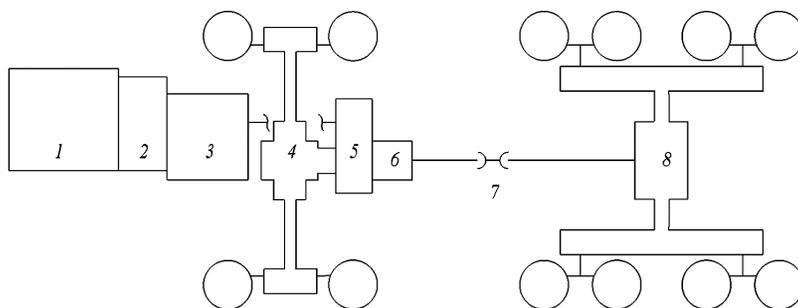


Рис. 3. Состав трансмиссии лесной колесной машины на примере трактора «FMG LOKOMO-810» [4]: 1 – двигатель PERKINS 1004-4T; 2 – гидротрансформатор CLARK; 3 – коробка передач CLARK 18000; 4 – передний ведущий мост; 5 – редукторная часть раздаточной коробки; 6 – межосевой симметричный дифференциал; 7 – карданная передача; 8 – задняя ведущая тележка

Fig. 3. The composition of the transmission of a forestry wheeled vehicle using the example of the FMG LOKOMO-810 tractor [4]: 1 – PERKINS 1004-4T engine; 2 – CLARK torque converter; 3 – CLARK 18000 gearbox; 4 – front drive axle; 5 – transfer case gearbox; 6 – center symmetric differential; 7 – cardan gear; 8 – rear drive bogie

Межосевое передаточное отношение в дифференциале подбирают приблизительно равным соотношению нормальных реакций под колесами мостов на наиболее характерных режимах движения [1, 17]. Согласно статистике [2, 4], около 40 % рабочего времени трелевочного трактора занимает холостой ход (самопередвижение). Таким образом, в это время выгодно использовать симметричный дифференциал. В остальное время задний мост нагружен больше переднего. Для полностью заполненного сортиментовоза подобная тенденция тоже будет выражена. Передний мост разгружается и при движении на подъем.

Таким образом, блокировка дифференциала решает задачу преодоления экстремальных дорожных сопротивлений, но актуальным остается вопрос повышения энергоэффективности шасси при систематической эксплуатации с различной нагрузкой. Возможным здесь представляется применение управляемого межосевого механизма распределения мощности на основе конического или цилиндрического дифференциала [1, 17].

На рис. 4 показана упрощенная кинематическая схема управляемого межосевого механизма распределения мощности, в котором симметричный дифференциал дополнен понижающим редуктором, установленным в ветви привода заднего моста.

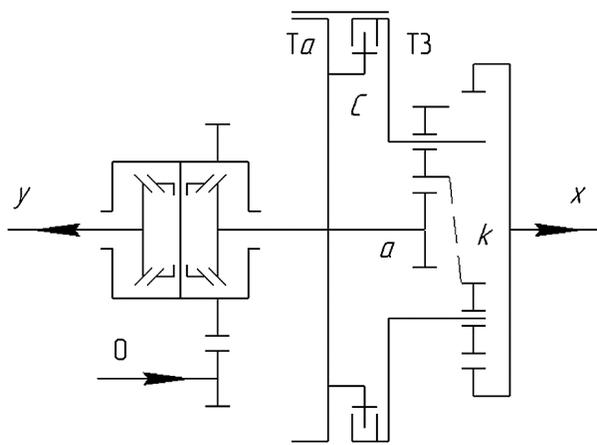


Рис. 4. Вариант упрощенной кинематической схемы управляемого межосевого механизма распределения мощности на основе симметричного дифференциала

Fig. 4. A variant of a simplified kinematic diagram of a controlled center-to-center power distribution mechanism based on a symmetric differential

На рис. 4 использованы следующие обозначения: 0 и a – ведущее и промежуточное звенья; x и y – ведомые (выходные) звенья привода заднего и переднего мостов; Ta , $T3$, C – элементы управления; k – внутреннее передаточное отношение (кинематический параметр) планетарного ряда.

Принцип работы предлагаемого механизма состоит в следующем.

Первый режим работы. При равномерном распределении нагрузок между передним и задним мостами тормоза Ta и $T3$ отключены, блокирующий фрикцион C полностью включен. Блокирующий фрикцион следует выполнить по схеме «постоянно включенного»; тормоза, как характерно и для коробок передач, проектируются «постоянно выключенными» [14, 15, 19]. Привод элементов управления может быть механическим, электромеханическим или электрогидравлическим [10, 11, 18, 23].

Крутящий момент с полуоси a дифференциала без изменения передается на выходное звено x . Силовые соотношения в симметричном дифференциале описываются зависимостью:

$$M_y = M_x = M_0/2.$$

Кинематика симметричного дифференциала подчиняется зависимости:

$$\begin{cases} \omega_y + \omega_a = 2\omega_0; \\ \omega_a = \omega_x. \end{cases}$$

Силовые и кинематические соотношения взяты из традиционной теории планетарных передач [1, 14, 15].

Второй режим работы. При неравномерном распределении нормальных реакций между мостами (полная загрузка, движение на подъем) элементы управления Ta и C отключены, полностью включен тормоз $T3$.

Для выполнения силового анализа запишем систему уравнений, связывающих крутящие моменты на основных звеньях механизма:

$$\begin{cases} M_y = M_a^{(D)}; \\ M_0 = 2M_y; \\ M_a^{(D)} + M_a^{(R)} = 0; \\ M_3 + M_{T3} = 0; \\ M_x = -kM_a^{(R)}, \end{cases}$$

где R – дополнительный редуктор; k – кинематический параметр планетарного механизма дополнительного редуктора.

Первые 2 уравнения в системе описывают распределение крутящих моментов в дифференциале, причем $M_a^{(D)}$ – крутящий момент, который получает звено a в дифференциале.

Третье уравнение характеризует равновесие звена a , здесь $M_a^{(R)}$ – крутящий момент, который приобретает звено a в дополнительном редукторе.

Четвертое уравнение соответствует равновесию звена 3, остановленного тормозом $T3$, M_{T3} – крутящий момент на этом тормозе.

Межосевое передаточное отношение определяется зависимостью:

$$u^* = M_y/M_x = 1/k.$$

Таким образом, задавая кинематический параметр, можно определять межосевое передаточное отношение. Например, при $k = 2$ механизм распределяет крутящие моменты как традиционный для грузовых автомобилей несимметричный дифференциал, в соотношении 1:2. При этом дифференциальная связь между мостами сохраняется, и циркуляция мощности исключена.

Для такого случая получим: $k = 2$; $M_y = M_0/2$; $M_3 = -M_0/2$; $M_x = 2M_y = M_0$.

Из теории планетарных передач известно ограничение, накладываемое на кинематический параметр в силовой передаче:

$$1,6 \leq |k| \leq 4,0.$$

Планетарный ряд с меньшим кинематическим параметром не будет долговечен по причине недостаточности места для размещения подшипников сателлитов. Ряд с большим кинематическим параметром имеет чрезмерную массу и габариты и плохо komponуется.

Следовательно, для межосевого передаточного отношения можно записать:

$$0,625 \leq |u^*| \leq 0,250.$$

Таким образом, крутящий момент на заднем ведущем мосту (тележке) может быть в 4 раза больше, чем подводимый к переднему мосту, если это предусмотрено конструкцией редуктора. Опционально следует заранее продумать линейку редукторов, различающихся передаточным отношением.

Кинематика механизма описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \omega_y + \omega_a = 2\omega_0; \\ \omega_a = k\omega_x + (1 - k)\omega_3; \\ \omega_3 = 0. \end{cases}$$

Или после решения: $\omega_y + k\omega_x = 2\omega_0$.

Третий режим работы – это движение с отключенным задним мостом. Режим востребован на дорогах общего пользования при перегоне машины своим ходом. В этом случае элементы управления ТЗ и С отключены, тормоз Та полностью включен.

Силовые соотношения:

$$\begin{cases} M_y = M_a; \\ M_0 = 2M_y; \\ M_a + M_{Ta} = 0. \end{cases}$$

Откуда $M_y = M_0/2$; $M_{Ta} = -M_0/2$.

Кинематические соотношения:

$$\begin{cases} \omega_y + \omega_a = 2\omega_0; \\ \omega_a = 0. \end{cases}$$

Откуда $\omega_y = 2\omega_0$ – дифференциал работает как ускоряющая передача.

Переключения режимов работы предпочтительно производить на неподвижной машине, поэтому использование дисковых элементов управления не является обязательным.

Аналогичный эффект можно получить, применяя вальный дополнительный редуктор, реализующий 2 передачи – прямую и с передаточным отношением u^* .

Представленное исследование призвано привлечь внимание отечественных разработчиков к перспективам развития управляемых межосевых механизмов распределения мощности. Теоретическая база указывает, что проблема нуждается в конструкторской проработке и опытном внедрении.

Преимущества рассматриваемой схемы:

упрощение конструкции по сравнению с предлагаемыми ранее вариантами [16];

высокая универсальность в применении на лесных, транспортных и транспортно-технологических машинах благодаря использованию симметричного дифференциала в качестве основы;

возможность выбора диапазона передаточных отношений.

Ожидаемые недостатки:

уменьшение эффективности при включении редуктора (приблизительно на 1,0...1,5 %);

увеличение массы и, что важнее для трансмиссии трактора, момента инерции;

повышение крутящего момента в ветви трансмиссии за дополнительным редуктором при его включении.

Последнее наиболее важно – при использовании предлагаемой концепции необходимо, как минимум, провести поверочные расчеты узлов и агрегатов, подвергающихся действию увеличенного момента. Чтобы не нагружать карданную передачу, дополнительный редуктор целесообразно разместить перед главной передачей.

Материально-технической базой для производства подобных механизмов и возможностями по обеспечению проектирования обладают предприятия, входящие в группу «Кировский завод» (АО «Петербургский тракторный завод», АО «Универсалмаш»), сохранившие, в частности, опыт разработки и серийного выпуска военных гусеничных машин (основной танк Т-80 и специальные машины на его шасси; плавающий танк ПТ-76).

Применение управляемого межосевого дифференциала может повысить эксплуатационные показатели лесных гусеничных машин за счет увеличения полноты использования тягово-сцепных свойств шасси. Подобный механизм будет полезен в трансмиссии 4-гусеничной машины (в частности, в случае установки треугольных гусеничных модулей вместо ведущих колес изначально колесного трактора).

Выводы

1. Данные об условиях эксплуатации лесных машин позволяют сделать вывод о необходимости рассмотрения вопроса применения в их трансмиссиях управляемых межосевых дифференциалов.

2. Расчеты, приведенные в статье, служат иллюстрацией потенциала таких механизмов распределения мощности и указывают на целесообразность дальнейших теоретических и практических работ в этом направлении.

3. При конструировании подобных механизмов можно применить подходы, апробированные в теории движения колесных и гусеничных машин и методы проектирования узлов трансмиссий транспортных машин.

4. С целью максимальной локализации производства управляемых межосевых дифференциалов представляется возможным воспользоваться технологиями, используемыми на предприятиях, имеющих опыт производства транспортных гусеничных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреев А.В., Ванцевич В.В., Лефаров А.Х. Дифференциалы колесных машин. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.
Andreev A.V., Vantsevich V.V., Lefarov A.Kh. *Differentials of Wheeled Vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 176 p. (In Russ.).
2. Анисимов Г.М. Условия эксплуатации и нагруженность трансмиссии трелевочного транспорта. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 166 с.
Anisimov G.M. *Operating Conditions and Transmission and Load Capacity of the Skidding Vehicle Transmission*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 166 p. (In Russ.).
3. Кочнев А.М. Теория движения колесных трелевочных систем. СПб.: Политехн. ун-т, 2007. 610 с.
Kochnev A.M. *Theory of Movement of Wheeled Skidding Systems*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2007. 610 p. (In Russ.).
4. Кочнев А.М. Рабочие режимы отечественных колесных трелевочных тракторов: моногр. СПб.: Политехн. ун-та, 2008. 519 с.
Kochnev A.M. *Operating Modes of Domestic Wheeled Skidders: Monograph*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2008. 519 p. (In Russ.).
5. Кочнев А.М., Довжик В.Л., Маснюк С.В., Носенко С.В. Анализ современных конструктивных решений трелевочных тракторов // Обоснование технических решений и параметров лесосечных машин: межвуз. сб. тр. СПб., 2007. С. 105–118.
Kochnev A.M., Dovzhik V.L., Masnyuk S.V., Nosenko S.V. Analysis of Modern Design Solutions for Skidders. *Justification of Technical Solutions and Parameters of Logging Machines: Interuniversity Collection of Papers*. St. Petersburg, 2007, pp. 105–118. (In Russ.).
6. Лесные машины / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.М. Анисимова. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 512 с.
Forestry Machines. Under the gen. ed. of doc. of tech. sci., prof. G.M. Anisimov. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 512 p. (In Russ.).
7. Лесотранспортные машины / под ред. Г.М. Анисимова. СПб.: Лань, 2009. 448 с.
Forestry Transport Machines. Under the ed. of G.M. Anisimov. St. Petersburg, Lan' Publ., 2009. 448 p. (In Russ.).
8. Носов Н.А., Галышев В.Д., Волков Ю.П., Харченко А.П. Расчет и конструирование гусеничных машин. Л.: Машиностроение, 1972. 560 с.
Nosov N.A., Galyshev V.D., Volkov Yu.P., Kharchenko A.P. *Calculation and Construction of Tracked Vehicles*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 560 p. (In Russ.).
9. Патыкин В.И., Григорьев И.В., Иванов В.А., Редькин А.К., Пошарников Ф.В., Шегельман И.Р., Ширнин Ю.А., Кацадзе В.А., Валижонков В.Д., Бит Ю.А., Матросов А.В. Технология и оборудование лесопромышленных производств. СПб.: СПбЛТА, 2009. 362 с.
Patyakin V.I., Grigoriev I.V., Ivanov V.A., Red'kin A.K., Posharnnikov F.V., Shegel'man I.R., Shirnin Yu.A., Katsadze V.A., Valizhonkov V.D., Bit Yu.A., Matrosov A.V. *Technology and Equipment for Forestry Production*. St. Petersburg, St. Petersburg Forest Technical Academy, 2009. 362 p. (In Russ.).
10. Поршневу Г.П., Добрецов Р.Ю., Красильников А.А. Трансмиссия с электромеханической передачей для тракторов и дорожно-строительных машин // Изв. МГТУ МАМИ. 2020. Т. 14, № 2. С. 33–41.
Porshnev G.P., Dobretsov R.Yu., Krasilnikov A.A. Electromechanical Transmission for Tractors and Road-Building Machinery. *Izvestia MGTU MAMI*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 33–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-44-2-33-41>
11. Проектирование и расчет специальных лесных машин / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. М.И. Зайчика. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 208 с.

Design and Calculation of Special Forestry Machines. Under the gen. ed. of doc. of tech. sci., prof. M.I. Zajchik. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 208 p. (In Russ.).

12. ТОО «EVS Group». Режим доступа: <https://kazagrotech.kz> (дата обращения: 27.06.25).

LLP "EVS Group". (In Russ.).

13. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: Профи-Информ, 2005. 344 с.

Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. *Technical Equipment for Modern Logging*. St. Petersburg, Profi-Inform Publ., 2005. 344 p. (In Russ.).

14. Шеломов В.Б. Проектирование наземных транспортно-технологических машин. Планетарные коробки передач. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 31 с.

Shelomov V.B. *Design of Ground Transport and Technological Machines. Planetary Gearboxes*. St. Petersburg, POLITEKH-PRESS, 2019. 31 p. (In Russ.).

15. Харитонов С.А. Автоматические коробки передач. М.: Аристель, АСТ, 2003. 335 с.

Kharitonov S.A. *Automatic Gearboxes*. Moscow, Aristel' Publ., AST Publ., 2003. 335 p. (In Russ.).

16. Чайкин А.П., Добрецов Р.Ю., Войнаш С.А., Соколова В.А., Загидуллин Р.Р., Тепноев А.В., Иванов А.А. Управляемый межосевой механизм распределения мощности // Грузовик. 2023. № 5. С. 3–7.

Chaikin A.P., Dobretsov R.Yu., Voinash S.A., Sokolova V.A., Zagidullin R.R., Tepnoev A.V., Ivanov A.A. Controlled Interaxle Power Distribution Mechanism. *Gruzovik = Truck*, 2023, no. 5, pp. 3–7. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-5-3-7>

17. Bosch. Автомобильный справочник: пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: За рулем, 2004. 992 с.

Bosch: Automobile Reference Book. Trans. from Eng. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Za Rulem Publ., 2004. 992 p. (In Russ.).

18. Dobretsov R.Yu., Demidov N.N., Kaninskii A.O. Friction Steering Devices as an Object of Impulse Control. *Advances in Mechanical Engineering*. Springer Cham, 2020, pp. 49–62. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1_6

19. Fischer R., Küçükay F., Jürgens G., Najork R., Pollak B. *The Automotive Transmission Book*. Springer Cham, 2015. 355 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05263-2>

20. Merhof W., Hackbarth E.-M. *Fahrmechanik der Kettenfahrzeuge*. Neubiberg, Universität der Bundeswehr, 2015. 530 p. (In Germ.).

21. Jazar R.N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*: 2nd ed. New York, Springer NY, 2014. 1066 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8544-5>

22. Ogorkiewicz R.M. *Technology of Tanks*. Sentinel House 163 Brighton Road Coulsdon Surrey: Jane's Information Group, 1991. 424 p.

23. Ushiroda Y., Sawase K., Takahashi N., Suzuki K., Manabe K. Development of Super AYC. *Technical Review*, 2003, no. 15, pp. 73–76.

24. Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*: 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., 2001. 528 p.

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

Original article

УДК 674.048

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-154-163

Assessment of the Impact of Boron Treatment by Impregnation Method on Finger-Jointed Pine (*Pinus caribaea*) Wood

*Chaminda Muthumala*¹, *PhD Holder*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-7717>

*Sudhira De Silva*², *Professor, PhD Holder*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-5097>

*Indika Arunakumara*³, *Professor*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7081-0215>

*Anura Alwis*⁴, *Professor*; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8888-4952>

*Faiz Marikar*⁵, *Director*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4579-7263>

¹State Timber Corporation, Sampathpaya, Rajamalwatta Road, Battaramulla, 10120, Sri Lanka; ck_muthumala@yahoo.com

²University of Ruhuna, Hapugala, Wakwella Road, Galle, 80000, Sri Lanka; sudhira@cee.ruh.ac.lk

³University of Ruhuna, Kamburupitiya, 1100, Sri Lanka; kkiuaruna@crop.ruh.ac.lk

⁴University of Ruhuna, Matara-Kamburupitiya Road, Mapalana, 81100, Sri Lanka; aalwis@ageng.ruh.ac.lk

⁵General Sir John Kotelawala Defence University, Kandawala Road, Ratmalana, 10390, Sri Lanka; faiz@kdu.ac.lk

Received on October 4, 2024 / Approved after reviewing on December 26, 2024 / Accepted on December 27, 2024

Abstract. Wood is a leading environmentally friendly construction material due to its renewability, carbon sequestration, and energy-efficient production. Sourced sustainably, it has a lower carbon footprint than concrete and steel while offering natural insulation for energy-efficient buildings. Wood stores as much as 15 times CO₂ released during its manufacture whereas aluminum and steel store negligible amounts. Finger joint is a sustainable technique used to ensure sustainable utilization of small pieces of wood removed as waste. Chemical protection of wood is performed with preservatives, such as insecticides, fungicides and UV protective finishes that are used for wooden materials. Softwood species are highly susceptible to deterioration caused by wood-destroying agents such as fungi, insects, and moisture. Without proper protection, their structural integrity and lifespan can be significantly reduced. Therefore, preservation treatments are essential to enhance durability, improve resistance to decay, and extend the usability of softwood in various applications. The objective of this study has been to evaluate the impact of boron treatment for finger-jointed pine wood samples on enhancing the durability of pine wood planks. Samples of pine wood with 19 mm-long fingers have been used for this study. Average tensile strength values of treated and untreated finger-jointed pine wood samples are higher than the recommended minimum requirement of tensile strength value (≥ 10 N/mm²). Failure modes of treated and untreated finger-jointed pine wood samples have also been described. Boron-treated, finger-jointed pine wood planks with 19 mm-long fingers offer improved durability and resistance to decay, making them well-suited for industrial applications. The treatment enhances the wood's structural integrity, extending its lifespan and performance in demanding environments.

Keywords: boron treatment, durability of wooden materials, finger joint, impregnation, pine, pine boards

For citation: Muthumala C., De Silva S., Arunakumara I., Alwis A., Marikar F. Assessment of the Impact of Boron Treatment by Impregnation Method on Finger-Jointed Pine (*Pinus caribaea*) Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 154–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-154-163>

Научная статья

Защитная обработка клеевых шиповых соединений заготовок из древесины сосны (*Pinus caribaea*) борсодержащим водным раствором

Ч. Мутхумала¹, *д-р наук*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-7717>

С. Де Силва², *проф., д-р наук*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-5097>

И. Арунакумара³, *проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7081-0215>

А. Алвис⁴, *проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8888-4952>

Ф. Марикар^{5✉}, *директор*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4579-7263>

¹Государственная лесная корпорация, Сампатпайя, Раджамалуэтта-роуд, Баттарамулла, Шри-Ланка, 10120; ck_muthumala@yahoo.com

²Университет Рухуны, Хапагала, Ваквелла-роуд, Галле, Шри-Ланка, 80000; sudhira@cee.ruh.ac.lk

³Университет Рухуны, Камбурупития, Шри-Ланка, 1100; kkiuaruna@crop.ruh.ac.lk

⁴Университет Рухуны, Матара-Камбурупития-роуд, дер. Мапалана, Шри-Ланка, 81100; aalwis@ageng.ruh.ac.lk

⁵Университет обороны им. генерала сэра Джона Котелавалы, Кандавала-роуд, Рамтамалана, Шри-Ланка, 10390; faiz@kdu.ac.lk ✉

Поступила в редакцию 04.10.24 / Одобрена после рецензирования 26.12.24 / Принята к печати 27.12.24

Аннотация. Древесина является ведущим экологически чистым строительным материалом, что обусловлено ее возобновляемостью, способностью к связыванию углерода и энергоемкостью процесса получения такого материала. Производство древесины оставляет меньший углеродный след по сравнению с производствами бетона и стали: древесина поглощает в 15 раз больше CO₂, чем выделяется при ее изготовлении, тогда как про алюминий и сталь этого сказать нельзя. При этом древесные материалы обеспечивают естественную энергоэффективную изоляцию для зданий. Шиповое соединение – устойчивая технология, позволяющая рационально использовать небольшие куски древесины, которые обычно классифицируются как отходы. Химическая защита древесины осуществляется с помощью консервантов, таких как инсектициды, фунгициды, а также УФ-защитные покрытия. Древесина хвойных пород сильно подвержена износу, вызванному грибками, насекомыми и влажностью. В отсутствие надлежащей защиты структурная целостность древесного материала может нарушиться, а срок службы – ощутимо сократиться. Следовательно, пропитки имеют важное значение для повышения долговечности и устойчивости древесины к гниению, а также расширения возможностей применения древесины хвойных пород в различных областях. Целью данного исследования стала оценка влияния воздействия бором на шиповые соединения материала из древесины сосны на долговечность досок из этого сырья. Использовались образцы древесины сосны с шиповым соединением длиной 19 мм. Средний предел прочности при растяжении обработанных и необработанных образцов древесины сосны с шиповым соединением превышает рекомендуемую минимальную проч-

© Мутхумала Ч., Де Силва С., Арунакумара И., Алвис А., Марикар Ф., 2025

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

ность при растяжении (≥ 10 Н/мм²). Также описаны виды разрушения обработанных и необработанных образцов сосны с шиповым соединением. Бор способствует повышению прочности и устойчивости досок к гниению, что делает их пригодными для промышленного применения. Такая обработка увеличивает структурную целостность древесины, продлевая срок ее службы и обеспечивая рост эксплуатационных характеристик в сложных условиях.

Ключевые слова: обработка бором, долговечность древесных материалов, шиповое соединение, пропитка, сосна, сосновые доски

Для цитирования: Muthumala C., De Silva S., Arunakumara I., Alwis A., Marikar F. Assessment of the Impact of Boron Treatment by Impregnation Method on Finger-Jointed Pine (*Pinus caribaea*) Wood // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 154–163.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-154-163>

Introduction

Wood is considered the most valuable renewable natural resource. The strength properties of solid wood and the natural durability of certain species offer a material which can be used in a wide range of applications such as building and construction, tools, utensils and furniture production, as well as providing a source of extractive for industrial, domestic and pharmaceutical purposes. In addition, wood is the basic raw material in paper making and textile industry and is also used in the manufacture of wood composites and panel products [1]. In fact, wood is considered to be the first structural material for mankind and today it becomes a more important product than any other material [21].

Climate change is one of the most pressing and burning issues facing the society in the next century. Mitigation of greenhouse gas emissions is an important contribution to minimize the effect on climate change [13]. For every kilogram of wood, 1.5 kg of CO₂ is removed from the atmosphere [12]. Storing CO₂ in wood materials is to be considered as an effective action to mitigate climate change [3].

Wood residues such as saw dust, offcuts, outside slabs are typically viewed as a burdensome disposal problem [17]. However, this material has a potential to be used in a sustainable way. Wood offcuts, sawdust, wooden pallets, wood shavings and similar kind of materials are considered as wastes [8]. 4 types of wood wastes are usually generated in furniture industry: offcuts of solid wood, offcuts of engineered wood products, sawdust and shavings [18].

Short length of sawn wood is considered to be the main issue in timber industry, though a few of them are already being used in fuel kiln-drying boilers. Another means of utilization of wastes is applying a jointing system through the finger joint technique. Finger joint technology ensures maximum utilization of wood wastes for minimizing the pressure on forest plantations [15]. Finger joint is an interlocking end joint formed by machining a number of similar tapered symmetrical fingers in the ends of timber members and then connected together by bonding material (BS EN, 15497). Finger joint is a sustainable and economically viable concept in furniture industry [10].

Wood can be deteriorated by wood destroying agents such as insects, fungi, marine borers and some other biological agents. Chemical protection of wood is performed with preservatives, such as fungicides, insecticides, fire retardants and UV protective finishes that are applied on the wood surface. The chemical protection

of wood is performed with chemical protective agents called “wood preservatives”. Fungicides used for wood protection are classified into 2 groups (organic and inorganic) according to their chemical structure [2].

Treatment processes such as drying, impregnation and surface treatments are applied to enhance the durability of wooden materials and the most effectively applied protection method for wooden materials is to treat them with an appropriate chemical [19]. Boron chemical compounds are the wood preservatives possessing both insecticide and fungicide properties. They are responsible for lower levels of environmental damage, no more toxic than common salt to humans and are accepted as one of the safest chemicals utilized as a preservative impregnation substance without heavy metals [9]. Although it is important that boron conserves a certain mobility to maintain the preservative action and, at the same time, decreasing its leach ability [6].

Pine (*Pinus caribaea*), a major softwood species grown in Sri Lanka, is used in furniture production and other light construction works. Pine wood is an important source of raw material in sawmilling and paper industry [5]. Softwood species are easily susceptible to deterioration by wood destroying agents. Thus, preservation is needed to enhance the durability of such wood. The aim of this research has been to assess the impact of borax and boric acid treatment by impregnation method on treated and untreated finger-jointed pine wood.

Research Objects and Methods

Materials. Pine wood samples have been taken from breast height of the first logs available at the State Timber Corporation, Galle, Sri Lanka (Latitude and longitude coordinates are: 6.053519, 80.220978). All the samples have been made of heartwood after preservation and seasoning processes (moisture content 12–14 %). Borax and boric acid mixture has been blended with water (23 kg of borax and 15 kg of boric acid per 1000 l of water) and used for the treatment solution with strength of 8 %. Impregnation process has been started with initial vacuum at 635 mmHg for 30 min and then impregnation treatment has been performed by borax and boric acid mixture at a temperature of 60 °C and pressure of 200–210 psi for 45 min. After that, the final vacuum has been done at 635 mmHg for 45 min (Fig. 1).



Fig. 1. The vacuum pressure impregnation plant

Manufacture of Finger Joints. All the samples have been made in accordance with the finger joint geometry shown in Fig. 2 and the samples have been prepared at the finger joint factory of the State Timber Corporation, Galle, Sri Lanka. Wooden planks with 19 mm-long fingers which are horizontally oriented to be used in finger joint applications have been made from softwood species like pine [14]. Polyvinyl acetate (PVA, P-SWR) D3 adhesive has been used at an assembling pressure of 6 MPa for making finger joint samples [14]. Sawn wood planks which have been placed under room temperature for 7 days have shown good structural performance compared to those placed under hot and wet conditions [4].

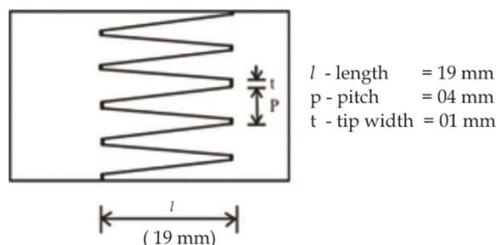


Fig. 2. The geometric parameters of a finger joint

Tensile Testing. Testing of the finger-jointed samples have been conducted in accordance with BS 373:1957 [20]. Dimensions of the sample and experimental setup are shown in Fig. 3. 10 finger-jointed wood samples without boron treatment have been tested and 10 boron-treated samples of pine wood have been used as control.

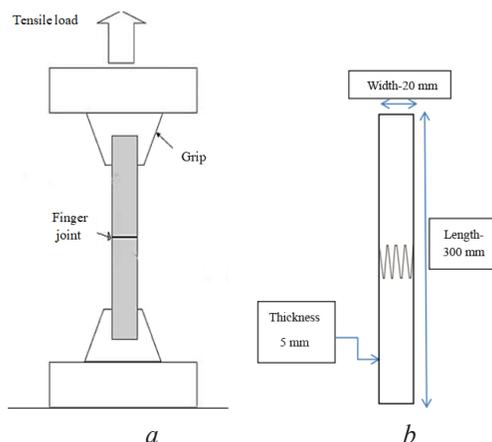


Fig. 3. The experimental setup dimensions (a) and the sample prepared for tensile testing (b)

Tensile strength has been calculated using the following equation:

$$\text{Tensile strength} = \frac{\text{Maximum load (N)}}{\text{Area of cross-section of test length (mm}^2\text{)}}$$

Failure modes have also been identified for both treated and untreated samples under tensile testing.

Calculation of Wood Density. Density values have been calculated using the equation below. Dry weight of the wood samples has been measured after placing the samples in an oven at 105 °C for 48 h [7].

$$\text{Density} = \frac{\text{Dry weight of oven-dried wood (kg)}}{\text{Wood volume (m}^3\text{)}}$$

Identification of Chemical Penetration. The process of the preservative infiltration into wood is known as penetration. Prior to adding colorants, a sample has

been cut in the middle away from the end to prevent longitudinal penetration. After that, turmeric treatment has been applied to the cut wood surface. The indicator used to gauge boron penetration has been a shift in colour to red. After that, the penetration depth has been observed by naked eye.

Determination of Chemical Retention. Retention is the amount of chemical preservatives that are kept in a unit volume of wood, which is measured in kg/m^3 . Chemical retention has been calculated using the equation:

$$\text{Chemical Retention (kg/m}^3\text{)} = \frac{GC}{V} \cdot 10^3,$$

where G – amount of solution absorbed by wood that is calculated by $T_2 - T_1$; T_1 , T_2 – wood weight before and after impregnation, correspondently (g); C – solution concentration (%); V – sample volume (cm^3).

Results and Discussion

By contrasting untreated and treated pine wood samples, the effects of borax and boric acid treatment on finger-jointed samples have been examined. The average density of pine samples has been found to range from 645 to $650 \text{ kg}/\text{m}^3$. The purpose of this study has been to evaluate the effects of treatment on the wood mechanical strength, durability, resistance to biological deterioration and dimensional stability, among other aspects.

The application of borax and boric acid treatment is well recognized for giving wood products fire retardancy and resistance to insect and fungal attacks. Researchers have put finger-jointed pine wood samples through this procedure in an attempt to see if the treated wood has performed better than the untreated sections. To determine the effectiveness of treatment, parameters like flexural strength, compressive strength, moisture content, and dimensional changes have been evaluated.

The results of this study may have an impact on the way that the woodworking industry operates, especially with regard to improving the durability and quality of finger-jointed pine products by using efficient treatment techniques. Furthermore, by extending the lifespan of wood products and lowering the need for frequent replacements due to degradation, knowledge of the effects of borax and boric acid treatment on commonly used wood species like pine can support sustainable forestry practices.

Fig. 4 shows how finger-jointed samples have performed in tensile testing. The findings have revealed that the finger-jointed samples have failed after tensile testing in every instance examined. This implies that the samples have been subjected to enough stress during tensile testing to result in failure.

Fig. 4. The untreated (a) and treated (b) failure finger-jointed samples



In the course of the research, T-tests have also been conducted in order to assess the statistical significance of the test results. The table above, containing a summary of the T-test results, provides pertinent statistical information and the results of comparison between the treated and untreated samples.

The T-test results and failure modes of boron-treated and untreated samples

Untreated / treated wood sample	Glue line failure (%)	Wood grain failure (%)	Finger break failure (%)	Average tensile strength (N/mm ²)	Standard deviation	Standard mean
Untreated	–	20	80	35.46	9.23	3.1
Treated	70	–	30	12.96	4.72	1.6

Note: T-value = 6.51, P-value = 0.000, DF = 11.

Moreover, the samples' failures throughout the testing are explained by the failure modes listed in the table, providing information about the type of mechanical failure, such as shear failure, tensile rupture, or another type of failure. In order to evaluate the finger-jointed samples' structural integrity and performance characteristics under particular testing conditions used in the research, it is essential to comprehend these failure types.

The research has revealed that the average tensile strength of boron-treated pine wood samples (12.96 N/mm²) has been significantly lower than that of the untreated ones (35.46 N/mm²), with a T-value of 6.51 and a P-value of 0. This indicates that the bonding of finger-jointed samples has been adversely affected by the boron preservative.

The investigation has found multiple mechanisms of tensile failure in the examined samples, being glue line, finger break, and wood grain failures. More specifically, when it came to the treated samples, the finger-jointed connection points have been where most failures happened (Fig. 5). The glue line failures have accounted for a considerable majority (70 %) of these failures, suggesting that the boron preservative has had an adverse effect on the finger-jointed wood bonding. On the other hand, almost 30 % of the treated samples have had finger break failures which highlight the difficulties with bonding integrity in the treated samples.

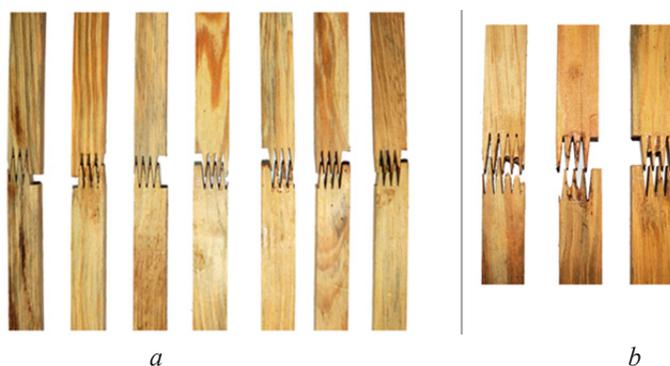


Fig. 5. The failure modes of the treated samples: *a* – glue failure; *b* – finger break failure

On the contrary, the untreated samples have shown a distinct pattern of failure mechanisms. Fig. 6 illustrates that finger break failures have accounted for around 80 % of the failures in the untreated samples. This implies that failures have occurred more often in the finger joints of the untreated samples than at the glue lines. Overall,

the results highlight how the boron preservative negatively affects the adhesive bond strength of finger-jointed wood, showing a discernible shift in treated samples toward glue line failures rather than the more common finger break failures seen in the untreated samples.

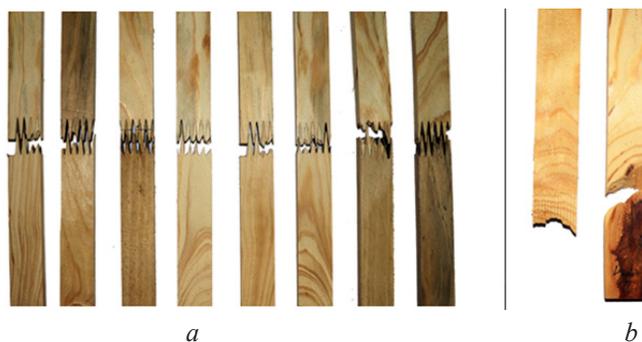


Fig. 6. The failure modes of the untreated samples: *a* – finger break failure; *b* – wood grain failure

The strength ratings of all the finger-jointed samples have exceeded those of the DIN/EN 204-D3 test. Prabhu et al. [16] have found that after 7 days of dry storage, the minimum tensile strength value required for the DIN/EN 204-D3 test should be ≥ 10 N/mm² (EN 204, 2001). This analysis has found that all finger-jointed samples bonded with SWR-D3 glue have had tensile strength values greater than ≥ 10 N/mm², indicating compliance with this value. According to Jayawardhane and Gunaratne [11], the mean carbon stock (t/ha) of Sri Lanka's pine monoculture forest plantations is 130.19 t/ha, a substantial increase above the 42.7 t/ha of teak monoculture forest plantations. For this reason, the use of pine in commercial replanting programs and its wood in make finger-jointed wood products could be regarded as an environmentally sound sustainable solution. Average retention amount of the boron chemical preservative has been 25 kg/m³.

Conclusion

With regard to the impact of borax and boric acid wood preservatives, the results have confirmed that the average strength value of the boron-treated finger-jointed samples has been lower than that of the untreated ones. But the average tensile strength values of the treated finger-jointed pine samples have been higher than the recommended minimum requirement for tensile strength value (≥ 10 N/mm²) after 7 days. Hence, boron-treated finger-jointed pine wood planks with 19 mm-long fingers can be recommended for effective use in industrial applications with enhancing the durability of wood. Lesser durability of the untreated pine wood is a major disadvantage for its maximum utilization. Therefore, preservation of pine wood is vital and the boron treatment with the mixture of borax and boric acid is an effective method to increase its durability.

REFERENCES

1. Abd El-Sayed E.S., El-Sakhawy M., El-Sakhawy M. A.-M. Non-Wood Fibers as Raw Material for Pulp and Paper Industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, iss. 2, pp. 215–230. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0064>

2. Alade A.A., Naghizadeh Z., Wessels C.B., Tyhoda L. A Review of the Effects of Wood Preservative Impregnation on Adhesive Bonding and Joint Performance. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022, vol. 36, iss. 15, pp. 1593–1617. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1981651>
3. Caldas L.R., Saraiva A.B., Lucena A.F.P., Da Gloria M.Y., Santos A.S., Filho R.D.T. Building Materials in a Circular Economy: The Case of Wood Waste as CO₂-Sink in Bio Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 166, art. no. 105346. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>
4. Chen C., Kuang Y., Zhu S., Burgert I., Keplinger T., Gong A., Li T., Berglund L., Eichhorn S.J., Hu L. Structure–Property–Function Relationships of Natural and Engineered Wood. *Nature Reviews Materials*, 2020, vol. 5, pp. 642–666. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>
5. Dias A., Carvalho A., Silva M.E., Lima-Brito J., Gaspar M.J., Alves A., Rodrigues J.C., Pereira F., Morais J., Lousada J.L. Physical, Chemical and Mechanical Wood Properties of *Pinus nigra* Growing in Portugal. *Annals of Forest Science*, 2020, vol. 77, art. no. 72. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00984-8>
6. Dias K.B., Barreiros R.M. Preservative Treatments on Wood and Their Effects on Metal Fasteners. *Engineered Wood Products for Construction*, IntechOpen, 2021, chapt. 18. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98467>
7. Fadipe E.O., Obiana U.V., Aishatu M.Z. Proximate Analysis of Wood Saw Dust Collected from Ilorin Metropolis, Kwara State, Nigeria. *International Journal of Manufacturing, Material and Mechanical Engineering Research*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 1–5.
8. Franklin-Wallis O. *Wasteland: The Dirty Truth About What We Throw Away, Where it Goes, and Why It Matters*. Simon & Schuster Ltd., 2023. 400 p.
9. Ghani R.S.M. A Review of Different Barriers and Additives to Reduce Boron Movement in Boron Dual Treated Wood. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 160, art. no. 106523. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106523>
10. Hartini S., Ciptomulyono U., Anityasari M., Sriyanto. Manufacturing Sustainability Assessment Using a Lean Manufacturing Tool: A Case Study in the Indonesian Wooden Furniture Industry. *International Journal of Lean Six Sigma*, 2020, vol. 11, no. 5, pp. 943–971. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2017-0150>
11. Jayawardhane J., Gunaratne A.M.T.A. Restoration Success Evaluation of a Thinned and Enriched Pine Plantation in Sri Lanka. *Journal of Tropical Forest Science*, 2020, vol. 32, no. 4, pp. 402–413. <https://doi.org/10.26525/jtfs2020.32.4.402>
12. Mihelcic J.R., Zimmerman J.B. *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*: 3rd ed. John Wiley & Sons, 2021. 736 p.
13. Mikhaylov A., Moiseev N., Aleshin K., Burkhardt T. Global Climate Change and Greenhouse Effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 2897–2913. [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
14. Muthumala C.K., De Silva S., Alwis P.L.A.G., Arunakumara K.K.I.U. Identification of the Best Finger Joint Configuration for Sri Lankan Wood Species Based on the Flexural Strength. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2021, vol. 18, pp. 89–96. <https://doi.org/10.1007/s13196-021-00284-2>
15. Muthumala C.K., De Silva S., Arunakumara K.K.I.U., Alwis P.L.A.G. Assessment of the Shear Failure Modes of Softwood and Hardwood Timber under Different Wood Joints. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2023, vol. 23, pp. 1216–1221. <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01672-1>
16. Prabhu R., Jagtap R., Digar M. Study on Incorporating Wattle Tannin in Polyvinyl Acetate Emulsion and its Effect on Properties for Wood Bonding Application. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, art. no. 1722. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03516-1>

17. Rumo D. Forgotten Dust: Following Plasterboard for Non-Destructive Circular Economies. *Frontiers in Sustainability*, 2023, vol. 4, art. no. 994452.

<https://doi.org/10.3389/frsus.2023.994452>

18. Szczurek A., Maciejewska M., Zajiczek Ż., Mościcki K. Detection of Emissions from the Combustion of Wood-Based Materials Being Furniture Industry Waste. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, vol. 12, iss. 2, pp. 375–385.

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.11.018>

19. Vani C.N., Prajwal S., Sundararaj R., Dhamodaran T.K. Chemical Preservatives in Wood Protection. *Science of Wood Degradation and its Protection*, Singapore, Springer, 2022, pp. 559–587. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8797-6_16

20. Wilson U.N., Sani J.E., Sadiq J.A., Abdulwahab M.T., Abubakar P., Rahmon R.O. Investigating the Effect of Flexural Strength of I and Box African Birch Built-up Beam on Nail Spacing. *NIPES – Journal of Science and Technology Research*, 2022, vol. 4, no. 4, pp. 186–197. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7486333>

21. Zwerger K. *Wood and Wood Joints: Building Traditions of Europe, Japan and China*. Birkhäuser, 2023. 340 p. <https://doi.org/10.1515/9783035624847>

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

Научная статья

УДК 674.812.02

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-164-172

Особенности пропитки древесины водорастворимыми защитными средствами

А.А. Лычаков¹, канд. техн. наук, проф.; ResearcherID: [LKO-3615-2024](https://orcid.org/0009-0000-1606-332X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1606-332X>

К.Н. Куликов¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [LKK-3749-2024](https://orcid.org/0009-0006-4417-7344),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4417-7344>

В.Н. Евгенов², начальник отдела; ResearcherID: [LIC-5261-2024](https://orcid.org/0009-0004-2865-3799),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2865-3799>

С.В. Лодочников^{2✉}, начальник отдела; ResearcherID: [LIC-3429-2024](https://orcid.org/0009-0000-4003-8490),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4003-8490>

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

²АО «НИПТБ «Онега», пр. Машиностроителей, д. 12, г. Северодвинск, Архангельская обл., Россия, 164509; evgenov@onegastar.ru, lodserg@onegastar.ru[✉]

Поступила в редакцию 15.10.24 / Одобрена после рецензирования 13.12.24 / Принята к печати 16.12.24

Аннотация. Пропитка древесины водорастворимыми средствами широко применяется в различных отраслях промышленности. К примеру, в судостроении такой способ подготовки сырья распространен при изготовлении строительных лесов: их обрабатывают антипиренами, чтобы достичь соответствия требованиям пожарной безопасности. Пропитка может проходить быстрее и эффективнее под давлением. С учетом данных об условном пределе прочности при сжатии поперек волокон для сосны и ели, а также характеристик стенов пропитки, модернизированных на предприятиях, практический интерес представляет исследование процесса пропитки при гидравлическом давлении 1...5 МПа. Для этого была разработана экспериментальная установка и изготовлены образцы из древесины ели, обладающие равными размерами, массой и влажностью, но различающиеся по типу древесины (ядровая, заболонная, смешанная), а также по расположению годовых колец (радиально или тангенциально). В ходе эксперимента изучалась зависимость глубины пропитки древесины для образцов древесины 6 групп от избыточного давления и продолжительности выдержки. В качестве раствора для пропитки использовался раствор метиленовой сини, что позволило оценить глубину пропитки образцов. Фиксировалось также сохранение формы лабораторных образцов после действия высокого гидравлического давления. Исходя из результатов исследования, наиболее целесообразным представляется повышение давления раствора в пропиточном цилиндре до 3 МПа, дальнейшее увеличение не приводит к значительным изменениям. Ощутимого влияния на форму лабораторных образцов гидравлического давления не наблюдалось. Полученные зависимости свидетельствуют о возможности существенно сократить продолжительность пропитки древесины водорастворимыми защитными средствами, что, в свою очередь, способствует росту производительности и снижению себестоимости конечной продукции.

Ключевые слова: пропитка древесины, высокое давление, антипирены, защитные средства, экспериментальная установка



Для цитирования: Лычаков А.А., Куликов К.Н., Евгенов В.Н., Лодочников С.В. Особенности пропитки древесины водорастворимыми защитными средствами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 164–172. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-164-172>

Original article

Features of Wood Impregnation with Water-Soluble Protective Agents

*Aleksandr A. Lychakov*¹, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [LKO-3615-2024](https://orcid.org/0009-0000-1606-332X), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1606-332X>

*Konstantin N. Kulikov*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [LKK-3749-2024](https://orcid.org/0009-0006-4417-7344), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4417-7344>

*Vadim N. Evgenov*², Head of Department; ResearcherID: [LIC-5261-2024](https://orcid.org/0009-0004-2865-3799), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2865-3799>

*Sergey V. Lodochnikov*², Head of Department; ResearcherID: [LIC-3429-2024](https://orcid.org/0009-0000-4003-8490), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4003-8490>

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

²Joint-Stock Company “Research and Development Design and Technology Bureau “Onega”, proezd Mashinostroitelej, 12, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164509, Russian Federation; evgenov@onegastar.ru, lodserg@onegastar.ru

Received on October 15, 2024 / Approved after reviewing on December 13, 2024 / Accepted on December 16, 2024

Abstract. Wood impregnation with water-soluble agents is widely used in various industries. For example, in shipbuilding, this method of preparing raw materials is common in the manufacture of scaffolding: they are treated with fire retardants to meet fire safety requirements. Impregnation can be performed faster and more efficiently under pressure. Taking into account the data on the conditional compressive strength across fibers for pine and spruce, as well as the characteristics of impregnation stands upgraded at enterprises, it is of practical interest to study the impregnation process under hydraulic pressure of 1...5 MPa. For this purpose, an experimental setup has been developed and samples of spruce have been made, having equal dimensions, weight and moisture content, but differing in the type of wood (heartwood, sapwood and mixed), as well as in the arrangement of annual rings (radial or tangential). During the experiment, the dependence of the depth of wood impregnation for wood samples of 6 groups on excess pressure and duration of exposure has been studied. A methylene blue solution has been used as the impregnation solution, which has made it possible to estimate the depth of impregnation of the samples. The preservation of the shape of laboratory samples after exposure to high hydraulic pressure has also been recorded. Based on the results of the study, it seems most appropriate to increase the solution pressure in the impregnation cylinder to 3 MPa; a further increase does not lead to significant changes. No noticeable effect of hydraulic pressure on the shape of laboratory samples has been observed. The obtained dependencies indicate the possibility of significantly reducing the duration of wood impregnation with water-soluble protective agents, which, in turn, contributes to increased productivity and lower cost of final products.

Keywords: wood impregnation, high pressure, fire retarders, protective agents, experimental setup

For citation: Lychakov A.A., Kulikov K.N., Evgenov V.N., Lodochnikov S.V. Features of Wood Impregnation with Water-Soluble Protective Agents. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 164–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-164-172>

Введение

Пропитка древесины широко применяется для уменьшения горючести древесины, что снижает риск пожаров и связанного с ними ущерба в различных отраслях промышленности (строительной, судостроительной, судоремонтной и др.) [1].

В судостроении значительный объем древесины используется для изготовления строительных лесов, преимуществом которых является возможность адаптации к различным формам и размерам судов. Некоторые предприятия судостроительной отрасли сами готовят пиломатериалы, пропитывая древесину в соответствии с инструкцией [17].

Огнезащита строительных лесов направлена на обеспечение безопасности рабочих, материалов и объектов судостроения и судоремонта. В связи с устойчивым высоким уровнем числа пожаров на судостроительных и судоремонтных предприятиях [13] вопрос необходимости такой подготовки является актуальным. Строительные леса, подмости должны быть изготовлены в соответствии с ОСТ 5.9029–84 «Пиломатериалы, прошедшие глубокую огнезащитную обработку антипиренами с учетом ограничений», ГОСТ Р 53292–2009, относиться к группе слабогорючих в соответствии с Федеральным законом от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ст. 12, 13) или трудногорючих по ГОСТ 12.1.044–89.

Используемые пропиточные составы представляют собой водные растворы антипиренов, не образующих пленку, и формируют поверхностный огнезащищенный слой (поверхностная пропитка) древесины или огнезащиту в ее объеме (глубокая пропитка) [4, 12]. Правила противопожарного режима в Российской Федерации, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 16.09.2020 № 1479 и корпоративный стандарт системы менеджмента качества АО «ОСК» СТО ОСК.КСМК 12.003–2019 устанавливают требования к огнезащитному покрытию в соответствии с нормативными документами по пожарной безопасности, а также технической документацией изготовителя средства огнезащиты и (или) исполнителя огнезащитных работ. При отсутствии в технической документации сведений о периодичности проверки контроль качества огнезащитности производится не реже 1 раза в год.

Пропитка под давлением рабочей среды в пределах 0,07...0,20 МПа является наиболее распространенным методом введения защитных средств в материал при модифицировании древесины [3, 7]. Учитывая периодический характер работы данных участков, представляется целесообразным повышение их производительности в цикле без дополнительных инвестиционных затрат. Интенсификация процесса пропитки на этих участках за счет увеличения давления пропитки возможна при использовании оборудования, изготовленного реновацией из демонтируемых при утилизации кораблей устройств, рассчитанных на более высокие давления, чем серийно выпускаемые промышленностью автоклавы.

Целью исследования стало определение возможности сокращения продолжительности обработки древесины антипиренами при повышенном давлении без деформации образцов [5, 6, 18, 19].

Объекты и методы исследования

Применяются следующие основные режимы пропитки под давлением [13, 20–24]: 1) вакуум – гидравлическое давление – вакуум; 2) вакуум – атмосферное давление – вакуум; 3) воздушное давление – гидравлическое давление – вакуум; 4) многоцикличный режим (неоднократное повторение циклов вакуум – гидравлическое давление). Для пропитки водорастворимыми защитными средствами подходят режимы 1, 2, 4; для пропитки масляными защитными средствами – 2–4.

На практике пропитку древесины можно осуществлять как поперек, так и вдоль волокон, но по причине более простой аппаратной и технологической реализации пропитки поперек волокон длительное время модификация древесины проводилась в основном этим способом [9, 10, 15].

Исследования [8, 13] в области совершенствования технологических режимов пропитки под давлением до 2,0 МПа были направлены на обеспечение максимальных глубины, качества и производительности пропитки путем сочетания воздействия на древесину вакуума, воздушного давления, нагрева древесины и пропиточного раствора [16].

Ряд ученых при анализе проницаемости древесины газами и жидкостями [2, 11] проводили испытания при давлении до 1,0 МПа, считая, что древесина имеет сравнительно небольшую прочность при сжатии поперек волокон.

Вместе с тем, по данным [14], для основных промышленных пород древесины Северо-Запада России (сосны и ели) условный предел прочности при сжатии поперек волокон и влажности 12 % находится в пределах 5...7 МПа, а при влажности 30 % – составляет около 3 МПа. Объясняют это тем, что при пропитке древесины под давлением разность давлений в древесных слоях всегда меньше, чем при испытаниях на прочность, т. к. давление жидкости компенсируется давлением воздуха, сжимаемого в порах древесины.

Исходя из параметров стендов пропитки, модернизированных на предприятия, практический интерес представляют исследования процесса пропитки древесины при гидравлическом давлении 1...5 МПа.

Для проведения исследования процесса пропитки древесины при высоком давлении на лабораторных образцах была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1). Технические характеристики установки и эксперимента: количество образцов, размещаемых одновременно – 6 шт.; температура раствора в пропиточном цилиндре – 20...22 °С; давление раствора (P) в пропиточном цилиндре – 1...5 МПа; продолжительность (τ) выдержки под давлением – 3...30 мин.

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из древесины ели. Размер образцов – 32×45×270 мм. Боковые поверхности отфрезерованы для исключения влияния неровностей поверхности на глубину пропитки. Торцевые поверхности не имели сколов и трещин. Для предотвращения продольного движения раствора по образцу его торцевые поверхности обработаны силиконовым герметиком, который после высыхания образует прочную эластичную гидроизолирующую пленку. Эластичность гидроизолирующей пленки необходима при исследовании пропитки древесины поперек волокон при высоком давлении. Влажность образцов – не более 18 %. Контроль этого показателя осуществлялся кондуктометрическим электровлагомером.

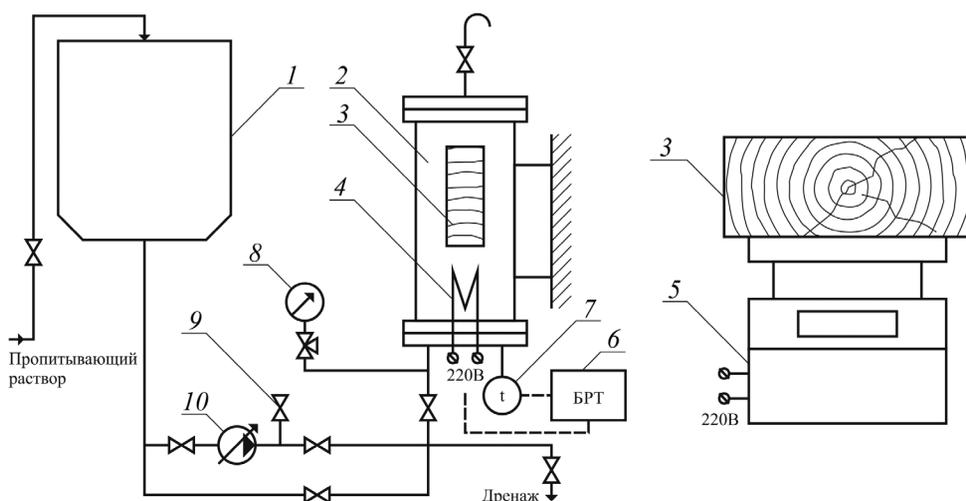


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – пропиточный цилиндр; 2 – бак пропиточного раствора; 3 – поршневой электронасос-дозатор ЭСКН-2/1-2; 4 – манометр; 5 – трубчатый нагревательный элемент; 6 – датчик температуры; 7 – блок регулирования температуры раствора в пропиточном цилиндре; 8 – предохранительный клапан; 9 – аналитические лабораторные весы ВАКТ-500Г-М; 10 – лабораторный образец

Fig. 1. The experimental setup scheme: 1 – impregnation cylinder; 2 – impregnation solution tank; 3 – piston electric dosing pump ESKN-2/1-2; 4 – pressure gauge; 5 – tubular heating element; 6 – temperature sensor; 7 – unit for regulating the temperature of the solution in the impregnation cylinder; 8 – safety valve; 9 – analytical laboratory balance VAKT-500G-M; 10 – laboratory sample

Отобранные образцы по массе и расположению годовых колец были разбиты на 6 групп (рис. 2). Отклонения масс образцов в каждой группе находились в пределах 5 % от среднего значения.

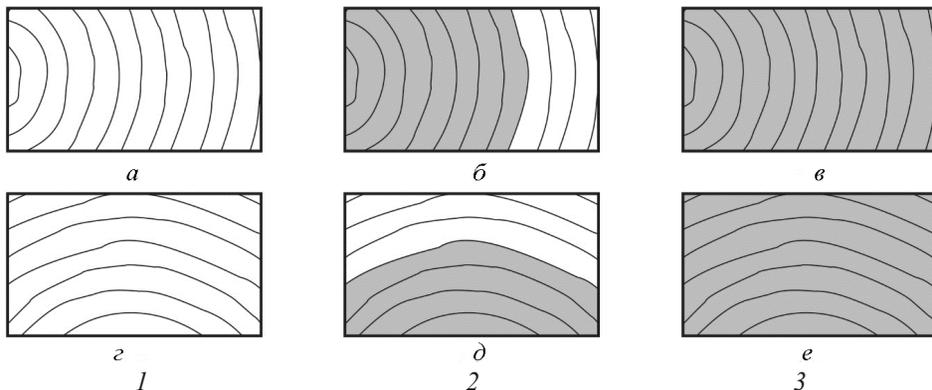


Рис. 2. Группы образцов по типу древесины и расположению слоев 1 – заболонная древесина; 2 – смешанная (ядровая заболонная) древесина; 3 – ядровая древесина; а, б, в – с радиальным расположением слоев; г, д, е – с тангенциальным

Fig. 2. The groups of samples by wood type and layering pattern: 1 – sapwood; 2 – mixed (heartwood and sapwood) wood; 3 – heartwood; а, б, в – with radial layering; г, д, е – with tangential layering

Экспериментально исследовалось влияние избыточного давления и продолжительности выдержки на глубину пропитки древесины. В качестве про-

питывающего раствора применялся 5%-й водный раствор метиленовой сини комнатной температуры (ГОСТ 4919.1–2016). Температура раствора поддерживалась в пределах 20...22 °С блоком регулирования температуры.

Пропитываемость δ оценивалась по относительному содержанию жидкости в древесине и определялась по формуле:

$$\delta = (m_2 - m_1) / m_1,$$

где m_1 и m_2 – масса образца до и после эксперимента соответственно.

Для получения зависимости δ от P и τ были взяты образцы из всех групп для каждого значения P и τ . Полученные значения усреднялись. Кроме указанных параметров оценивался характер распределения пропиточного раствора по поперечному сечению образца. Контролировалось также сохранение формы образцов, подверженных воздействию высокого гидравлического давления.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе пропитки отмечалось неравномерное распределение раствора по сечению (рис. 3). Глубина пропитки в радиальном направлении слоев древесины была в 1,5...3 раза меньше, чем в тангенциальном.

При повышении давления с 1 до 3 МПа δ возрастает более чем в 2 раза, а дальнейшее увеличение давления до >4 МПа не приводит к значительному приращению δ .

Полученные зависимости свидетельствуют о возможности существенно сократить продолжительность пропитки до нормативных показателей по массе пропитывающего раствора и глубине пропитки.

Ощутимого изменения формы образцов не наблюдалось.

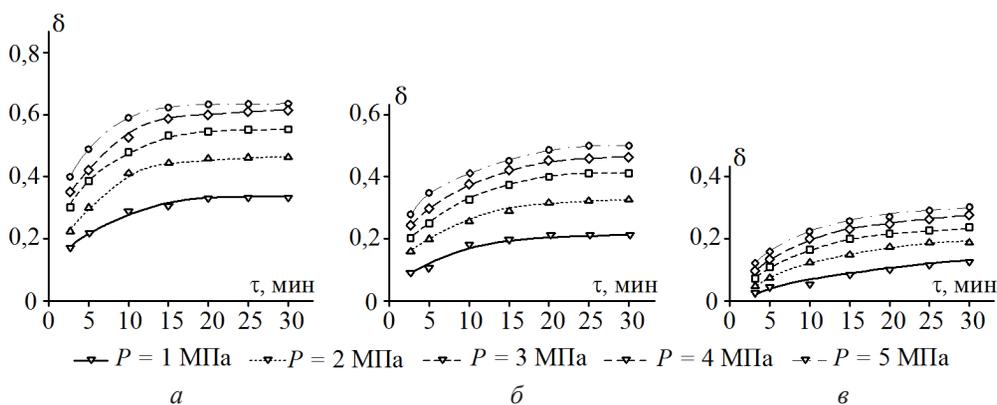


Рис. 3. Пропитываемость образцов из древесины *а* – заболонной; *б* – смешанной (ядровой заболонной); *в* – ядровой

Fig. 3. The impregnability of wood samples: *a* – sapwood; *б* – mixed (heartwood and sapwood); *в* – heartwood

Заключение

Полученные результаты являются продолжением исследований в направлении совершенствования технологии пропитки древесины в соответствии с параметрами, установленными стандартами ГОСТ 20022.7–82, ГОСТ 20012.0–82, ГОСТ 20022.13–81. Повышение давления при пропитке может стать факто-

ром, способствующим уменьшению продолжительности процесса до момента достижения заданных параметров, повышению производительности труда на вспомогательном производстве и снижению себестоимости конечной продукции предприятий.

По причине малых размеров образцов результаты представленного исследования могут носить предварительный характер. В ходе дальнейших научных изысканий следует провести испытания по пропитке древесины при повышенном давлении поперек и вдоль волокон на натуральных образцах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с.

Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Wood Reference Book*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 296 p. (In Russ.).

2. Горшин С.Н. Консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 335 с.
Gorshin S.N. *Wood Preservation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 335 p. (In Russ.).

3. Ермолин В.Н. Основы повышения проницаемости жидкостями древесины хвойных пород: моногр. Красноярск: СибГТУ, 1999. 100 с.

Ermolin V.N. *Fundamentals of Increasing the Permeability of Coniferous Wood with Fluids*: Monograph. Krasnoyarsk, Siberian State Technical University Publ., 1999. 100 p. (In Russ.).

4. Калниньш А.Я. Консервирование и защита лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1962. 143 с.

Kalnins A.Ya. *Preservation and Protection of Timber*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1962. 143 p. (In Russ.).

5. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С. Экспериментальные исследования процесса пропитки древесины гидроударом // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. Кострома, 2015. С. 74–77.

Kunitskaya O.A., Burmistrova S.S. Experimental Studies of the Process of Wood Impregnation with Hydraulic Impact. *Current Problems and Prospects for the Development of the Timber Industry Complex*: Collection of Scientific Papers of the III International Scientific and Technical Conference. Kostroma, 2015, pp. 74–77. (In Russ.).

6. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С. Моделирование процесса пропитки древесины в ударном пьезопериодическом поле // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 7-2(18-2). С. 55–59.

Kunitskaya O.A., Burmistrova S.S. Modeling Wood Impregnation Process in an Impact Piezoperiodic Field. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2015, vol. 3, no. 7-2(18-2), pp. 55–59. (In Russ.).

7. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Гончаров Ю.А. Поиск новых технических решений для повышения эффективности пропитки древесины // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: материалы республ. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию ПетрГУ. Петрозаводск, 2015. С. 16–17.

Kunitskaya O.A., Burmistrova S.S., Goncharov Yu.A. Search for New Technical Solutions to Improve the Efficiency of Wood Impregnation. *Intensification of the Formation and Protection of Intellectual Property*: Materials of the Republic Scientific and Practical Conference, Dedicated to the 75th Anniversary of the Petrozavodsk State University. Petrozavodsk, 2015, pp. 16–17. (In Russ.).

8. Ломакин А.Д. Защита древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 153 с.
Lomakin A.D. *Protection of Wood and Wood Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 153 p. (In Russ.).
9. Оснач Н.А. Проницаемость и проводимость древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 182 с.
Osnach N.A. *Permeability and Conductivity of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 182 p. (In Russ.).
10. Патент 2646612 РФ, МПК В27К 3/02. Способ пропитки древесины: № 2017106989: заявл. 02.03.2017; опубл. 06.03.2018. Бюл. № 7 / В.А. Шамаев, Д.А. Паринов; патентообладатель: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова.
Shamaev V.A., Parinov D.A. *Method of Wood Impregnation*. Patent RF 2646612, 2018. (In Russ.).
11. Серговский П.С., Расцев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
Sergovskij P.S., Rassev A.I. *Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 360 p. (In Russ.).
12. Справочное руководство по древесине. Лаборатория лесных продуктов США / пер. с англ. Я. Горелика, Т. Михайловой. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 544 с.
Wood Reference Guide. U.S. Forest Products Laboratory. Trans. from English by Ya. Gorelik, T. Mikhailova. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 544 p. (In Russ.).
13. Сухоловская П.В. Обеспечение пожарной безопасности на судостроительном заводе // Актуал. исследования. 2023. № 6(136). С. 40–45. Режим доступа: <https://apni.ru/article/5574-obespechenie-pozharnoj-bezopasnosti-na-sudostroytelnom-zavode> (дата обращения: 11.06.25).
Sukholovskaya P.V. Ensuring Fire Safety at the Shipyard. *Aktual'nye issledovaniya*, 2023, no. 6(136), pp. 40–45. (In Russ.).
14. Харук Е.В. Проницаемость древесины газами и жидкостями. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 190 с.
Kharuk E.V. *Permeability of Wood to Gases and Liquids*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 190 p. (In Russ.).
15. Шамаев В.А., Куницкая О.А., Григорьев И.В., Медведев И.Н., Паринов Д.А., Бурмистрова С.С. Пропитка древесины жидкостями под давлением // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 4(40). С. 152–156.
Shamaev V.A., Kunitskaya O.A., Grigorjev I.V., Medvedev I.N., Parinov D.A., Burmistrova S.S. Wood Impregnation with Fluids under Pressure. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2018, no. 4(40), pp. 152–156. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-4-152-156>
16. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины. М.: Наука, 2013. 456 с.
Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Wood Modification*. Moscow, Nauka Publ., 2013. 456 p. (In Russ.).
17. 741-42-668-77 Огнезащитная пропитка древесины. Инструкция, п/я А-7499, 1979.
741-42-668-77. *Fire-Retardant Impregnation of Wood*: Instruction, Post Office Box A-7499, 1979. (In Russ.).
18. Augustina S., Dwianto W., Wahyudi I., Syafii W., Gérardin P., Marbun S. D. Wood Impregnation in Relation to its Mechanisms and Properties Enhancement. *BioResources*, 2023, vol. 18, iss. 2, pp. 4332–4372. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.Augustina>
19. Frihart C.R. Adhesive Interactions with Wood. *Fundamental of Composite Processing*: Proceedings of a Workshop. Wisconsin, Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2004, pp. 29–38.
<https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-149>

20. Iida I., Yusuf S., Watanabe U., Imamura Y. Liquid Penetration of Precompressed Wood VII: Combined Treatment of Precompression and Extraction in Hot Water on the Liquid Penetration of Wood. *Journal of Wood Science*, 2002, vol. 48, pp. 81–85.

<https://doi.org/10.1007/BF00766243>

21. Robinson T.J., Via B.K., Fasina O., Adhikari S., Carter E. Impregnation of Bio-Oil from Small Diameter Pine into Wood for Moisture Resistance. *BioResources*, 2011, vol. 6, no. 4, pp. 4747–4761. <https://doi.org/10.15376/biores.6.4.4747-4761>

22. Uphill S.J., Cosgrove T., Briscoe W.H. Flow of Nanofluids through Porous Media: Preserving Timber with Colloid Science. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, vol. 460, pp. 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.05.008>

23. Wardrop A.B., Davies G.W. Morphological Factors Relating to the Penetration of Liquids into Wood. *Holzforschung*, 1961, vol. 15, no. 5, pp. 129–141.

<https://doi.org/10.1515/hfsg.1961.15.5.129>

24. Zhao Y., Zhao X., Iida I., Guo J. Studies on Pre-Treatment by Compression for Wood Impregnation II: The Impregnation of Wood Compressed at Different Moisture Content Conditions. *Journal of Wood Science*, 2019, vol. 65, art. no. 28.

<https://doi.org/10.1186/s10086-019-1808-2>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 678.031:54-112

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-173-184

Экстракция биологически активных веществ из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae

Р.Г. Сафин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

К.В. Валеев[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Д.Ф. Зиятдинова, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [U-1572-2017](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru[✉], Ziatdinova2804@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.24 / Одобрена после рецензирования 11.12.24 / Принята к печати 13.12.24

Аннотация. Описан процесс экстракции биологически активных веществ из недревесных частей деревьев (коры и листьев) ивы и осины. Приведено аппаратное оформление извлечения салицина и кверцетина из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae. Представлена методика экспериментального исследования и получения биологически активных веществ. Выявлено, что увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин при одинаковой температуре (75 °С) и 95%-й пропитке приводит к 2-кратному ускорению процесса. Описано изменение локальной температуры по слоям материала. Определено небольшое отставание в нагреве последующих слоев материала на 1–2 мин, которое обусловлено тепловыми инерциями материала и особенностями теплопередачи внутри слоя. Для достижения полного прогревания требуется время 7 мин. Построена кинетическая кривая концентрации извлеченных биологически активных веществ в экстракте. Итоговые зависимости и сравнительные данные позволяют рекомендовать рациональные режимы экстракции биологически активных веществ из коры и листьев деревьев ивы и осины. По результатам исследования рекомендована оптимальная температура экстракции кверцетина – 50 °С. Также было выявлено, что повышение температуры до 75 °С приводит к заметному увеличению выхода салицина. Кроме того, обнаружено: наибольшее количество кверцетина содержится в осине (1,4 %), причем в листьях его больше, чем в коре, на 11,4 %; основное количество салицина находится в коре обеих пород, но в коре ивы отмечается превышение на 35 %; рациональная концентрация растворителя составляет 60 %; продолжительность экстракции равна 40–45 мин.

Ключевые слова: Salicaceae, экстракция, переработка, биологически активные вещества, салицин, кверцетин, листья, кора

Благодарности: Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национально-го исследовательского технологического университета.

Для цитирования: Сафин Р.Г., Валеев К.В., Зиятдинова Д.Ф. Экстракция биологически активных веществ из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 173–184. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-173-184>

Original article

Extraction of Biologically Active Substances from the Bark and Leaves of Trees of the Salicaceae Family

Rushan G. Safin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-8575-2017](https://orcid.org/0000-0002-5790-4532),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

Kirill V. Valeev[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [HPC-5151-2023](https://orcid.org/0000-0002-5537-9332), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-9332>

Dilara F. Ziatdinova, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [U-1572-2017](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; safin@kstu.ru, kirval116@mail.ru[✉], Ziatdinova2804@gmail.com

Received on October 9, 2024 / Approved after reviewing on December 11, 2024 / Accepted on December 13, 2024

Abstract. The process of extraction of biologically active substances from non-woody parts of trees (bark and leaves) of willow and aspen is described in the article. The instrumentation for extracting salicin and quercetin from the bark and leaves of trees of the Salicaceae family is presented. A method for experimental research and obtaining of biologically active substances is presented. It has been found that an increase in the extractant consumption from 20 to 100 l/min at the same temperature (75 °C) and 95 % impregnation leads to a 2-fold acceleration of the process. Local temperature changes across the layers of the material have been described. A slight lag in heating of subsequent layers of the material by 1–2 min has been determined, which is due to the thermal inertia of the material and the peculiarities of heat transfer within the layer. It takes 7 min to achieve full heating. A kinetic curve of the concentration of extracted biologically active substances in the extract has been constructed. The resulting dependencies and comparative data allow us to recommend rational modes of extraction of biologically active substances from the bark and leaves of willow and aspen trees. According to the results of the research, the optimal temperature for quercetin extraction has been recommended to be 50 °C. It has also been found that increasing the temperature to 75 °C leads to a noticeable increase in the yield of salicin. Moreover, it has been revealed that the largest amount of quercetin is found in aspen (1.4 %), with 11.4 % more quercetin in the leaves than in the bark; the main amount of salicin is found in the bark of both species, but in willow bark there is an excess of 35 %; the rational solvent concentration is 60 %; the duration of extraction is 40–45 min.

Keywords: Salicaceae, extraction, processing, biologically active substances, salicin, quercetin, leaves, bark

Acknowledgements: The research was conducted using the equipment of the Center for Collective Use “Nanomaterials and Nanotechnologies” of the Kazan National Research Technological University.

For citation: Safin R.G., Valeev K.V., Ziatdinova D.F. Extraction of Biologically Active Substances from the Bark and Leaves of Trees of the Salicaceae Family. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 173–184. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-173-184>

Введение

Изучение процессов экстракции фенольных соединений из растительного сырья является важным направлением исследований в химии, биохимии фармацевтической, пищевой и медицинской промышленности. Фенольные соединения представляют собой обширный и разнородный класс органических веществ, которые играют ключевую роль в растительном метаболизме, обладают широким спектром биологической активности и важны в фармакологии [10, 14]. Фенолгликозиды и флавоноиды, особенно те, которые содержатся в растениях семейства ивовых *Salicaceae*, заслуживают особого внимания из-за множества их полезных свойств [3]. Одним из самых известных фенолгликозидов является салицин, извлекаемый из коры ивы и осины и служащий сырьем для синтеза ацетилсалициловой кислоты (аспирина) [6, 8, 15, 16].

Процесс экстракции фенольных соединений из растительного сырья характеризуется многоступенчатостью и включает несколько основных стадий. Важность каждой стадии обусловлена необходимостью максимального извлечения целевых соединений при минимизации потерь и необратимых изменений в активных компонентах [2, 4, 5, 11].

Экстрагирование древесного растительного сырья и зелени протекает в 4 стадии. На 1-й стадии экстрагент проникает внутрь сырья. На 2-й происходит растворение искомым веществ, находящихся в сырье. На 3-й экстрагируемые вещества путем молекулярной диффузии извлекаются из клеток растительного сырья. На последней стадии растворенные биологически активные вещества отводятся от поверхности экстрагируемого вещества в окружающую среду экстрагента [9, 17].

Для максимального выхода веществ высокой чистоты экстракцию следует проводить в кратчайшие сроки при оптимальных режимах, т. к. увеличение длительности процесса приводит к извлечению и сопутствующих веществ [12, 13].

Скорость внутренней диффузии от фронта растворения до поверхности пористой части заметно ниже скорости молекулярной диффузии вследствие извилистости пор, влияния их стенок и других факторов [18].

В работе Л.А. Гришковой и др. [1] описан способ переработки коры осины, включающий: измельчение коры осины *Populus tremula* L. в роторно-ножевой мельнице при начальной влажности 45 %; экстракцию биологически активных веществ органическими растворителями (бензин марки АИ-95) в экстракторе батарейного типа в течение 3,5 ч при температуре 100–120 °С; выпаривание экстрагента для производства витаминного концентрата; обработку жома острым паром в течение 30–60 мин для удаления бензина; экстракцию жома водой в продолжение 1–3 ч; сепарацию экстракта от жома; выделение дубильных веществ.

Е.В. Ломако и Н.А. Кузьмичева [7] исследовали влияние различных добавок на степень извлечения флавоноидов из древесного растительного сырья семейства *Salicaceae*. Эксперименты показали, что использование растворов мирамистина и полигексаметиленбигуанида гидрохлорида для экстрагирования флавоноидов из листьев ивы остролистной привело к получению экстрактов с содержанием флавоноидов в 2–4 раза выше, чем при использовании 70%-го этанола.

Juliana F. Soares et al. [19] приведены сведения о выходе экстрактов, извлеченных из отходов деревьев ивы и осины семейства Salicaceae методом сверхкритической флюидной экстракции. В работе представлены кинетические кривые зависимости выхода флавоноидов, состав экстрактов по жирным кислотам от температуры (40, 60 и 80 °С) и давления (15, 20 и 25 МПа). Температура экстракции 80 °С и давление 25 МПа обеспечивают наибольшие выход экстрактов (7,7 г сухого экстракта / 100 г сушеных семян тополя черного) и содержание полиненасыщенных жирных кислот в экстракте (65,1 %). Также после подбора кинетических параметров кривых экстракции были определены скорости экстракции и массовое соотношение сырья к экстрагенту.

I. Jerković et al. [16] проведена сверхкритическая флюидная экстракция, исследовано влияние давления, температуры и предварительного замачивания в воде плодов прутняка обыкновенного (*Vitex agnus-castus* L.) на выход экстрактивных веществ и эфирных масел.

На сегодняшний день разработаны разнообразные способы и аппаратные оформления процессов экстракции, однако выявлено, что выход биологически активных веществ зависит от места произрастания, концентрации и вида экстрагента, температуры и продолжительности экстракции и т. д., поэтому актуален поиск рациональных технологических параметров, влияющих на извлечение биологически активных веществ из деревьев ивы и осины.

Целью данной работы является определение оптимальных режимных параметров экстракции водно-спиртовым раствором биологически активных веществ из ивовых деревьев семейства Salicaceae, произрастающих в Республике Татарстан: расхода экстрагента, температуры, продолжительности пропитки сырья и экстракции.

Задачи исследования: поиск кинетических зависимостей процессов пропитки и извлечения биологически активных веществ от температуры и расхода экстрагента; установление степени влияния режимов процесса на выход кверцетина и салицина.

Объекты и методы исследования

Для проведения экстракции фенольных соединений использовали отходы деревьев семейства Salicaceae – кору и листья ивы и осины (рис. 1), – собранные в Республике Татарстан в апреле–мае 2024 г. Хранение образцов осуществляли в герметичной емкости не более 10 сут. Сушку сырья проводили в сушилке кипящего слоя при температуре 50–60 °С. Литературный обзор показал целесообразность применения в качестве экстрагента водно-спиртового раствора, обеспечивающего максимальный выход фенольных соединений.



Рис. 1. Отходы деревьев семейства Salicaceae: а – ива (*Salix*); б – осина (*Populus tremula*)
Fig. 1. The Salicaceae family tree waste: а – willow (*Salix*); б – aspen (*Populus tremula*)

Для определения рациональных параметров экстракции была разработана установка (рис. 2). Она состоит из теплообменника 1, выпарного аппарата 2, терморегулятора (ТРМ) 3, пробоотборников 4, 4.1, управляющих вентилях 5 и 10, нагревателя 6, центробежного насоса 7, расходомера 8, экстракционной емкости 9, смотрового окна 11, уровнемеров 12, емкости для нагрева экстрагента 13.

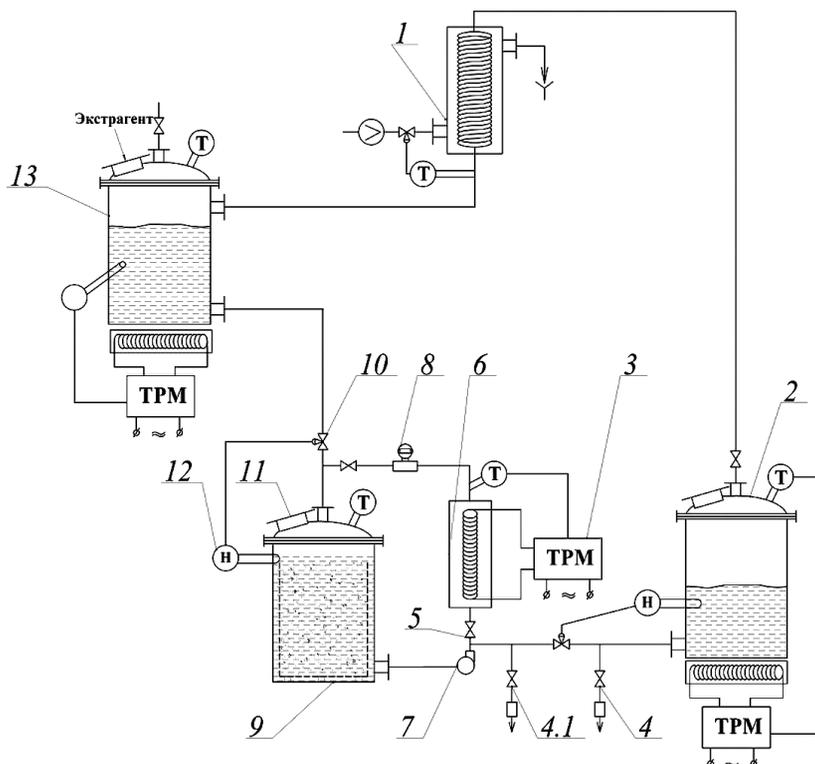


Рис. 2. Принципиальная схема установки для экстракции фенольных соединений из деревьев осины и ивы

Fig. 2. The schematic diagram of the plant for the extraction of phenolic compounds from aspen and willow trees

Растительное сырье, измельченное до размеров 1–2 мм, с начальной влажностью – 60 %, засыпали в фильтровальный мешок, затем загружали в экстрактор 9. Далее экстрактор герметизировали крышкой и в верхнюю часть экстрактора подавали нагретый экстрагент из емкости 13. После заполнения экстракционной емкости экстрагентом включали центробежный насос 7 для создания циркуляционного потока и нагреватель 6. Начальная температура сырья составляла 20–25 °С, а экстрагента – 70–75 °С. Температура сырья в экстракторе варьировала в пределах 25–75 °С. Концентрация спиртового раствора была 40–80 %. Температуру экстрагента поддерживали с помощью проточного нагревателя 6, датчика температуры и терморегулятора 3. Количество экстракта в экстракторе контролировали с помощью датчика уровня жидкости 12 и регулирующего вентиля 10.

Расход экстрагента (20, 60, 100 л/мин) при пропитке материала устанавливали вентилем 5 и расходомером 8. Концентрацию экстрагента во всех слоях сырья определяли отбором проб сверху через смотровое окно 11 каждые 4 мин. Температуру замеряли с помощью хромель-копелевых датчиков на разных вы-

сотах материала: 15, 250, 490 мм. Общая высота слоя составляла 500 мм. Конечный продукт из выпарного аппарата 2 выгружали через пробоотборник 4 и отправляли на дальнейшее исследование.

Изменение усредненного количества экстрактивных веществ в экстракте при экстрагировании определяли путем отбора проб (масса 10 г) через пробоотборник 4.1 каждые 10 мин, пробы упаривали, досушивали и взвешивали.

Содержание экстрагента в сырье при пропитке вычисляли как отношение разности масс пропитанного (m) и абсолютно сухого (m_c) материала (коры и листьев) к массе максимально пропитанного сырья m_{\max} :

$$C_3 = \frac{m - m_c}{m_{\max}} \cdot 100 \%$$

Для определения исходного содержания экстрактивных веществ в коре и листьях осины и ивы проводили исчерпывающую экстракцию в аппарате Сокслета с использованием 200 г 60%-го водно-спиртового раствора. После завершения экстрагирования из экстракта выпаривали экстрагент до достижения вязкого состояния и темно-оранжевого цвета. Упаренный экстракт переливали в выпарительную чашу и досушивали при температуре 50 °С в вакуумном сушильном шкафу до постоянного веса. Содержание кверцетина и салицина в экстрактах определяли жидкостным хроматографом PerkinElmer Flexar (табл. 1).

Таблица 1

Исходное содержание (%) кверцетина и салицина в коре и листьях осины и ивы
The initial content (%) of quercetin and salicin in the bark and leaves of aspen and willow

Вещество	Осина		Ива	
	кора	листья	кора	листья
Кверцетин	1,42	1,56	0,34	1,37
Салицин	1,10	0,28	1,72	0,32

Параметры процесса извлечения фенольных соединений (в т. ч. кверцетина) и фенолгликозидов (салицина) из отходов ивовых деревьев варьировали в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Режимы пропитки и экстрагирования коры и листьев осины и ивы
The modes of impregnation and extraction of aspen and willow bark and leaves

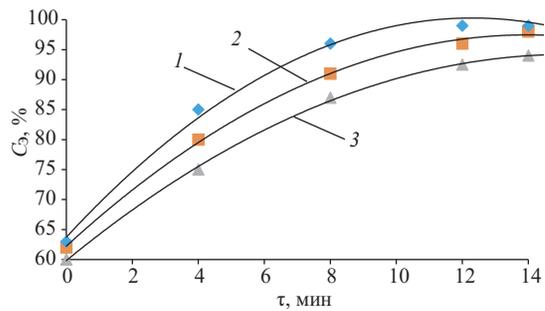
Фракция	Температура экстракции, °С	Концентрация спиртового раствора, %	Продолжительность обработки, мин	Гидромодуль
Листья	25, 50, 75, 80	40, 60, 80	15, 30, 45	1:65
Кора	40, 50, 75	40, 60, 80	15, 30, 45	1:100

Результаты исследования и их обсуждение

Данные измерения содержания экстрагента в коре осины представлены на рис. 3. Точками показаны экспериментальные значения, линиями – аппроксимационные зависимости.

Рис. 3. Кинетика пропитки коры осины при различных расходах экстрагента, л/мин: 1 – 100; 2 – 60; 3 – 20 (τ – продолжительность процесса)

Fig. 3. The kinetics of aspen bark impregnation at various extractant consumption rates, l/min: 1 – 100; 2 – 60; 3 – 20 (τ – duration of the process)

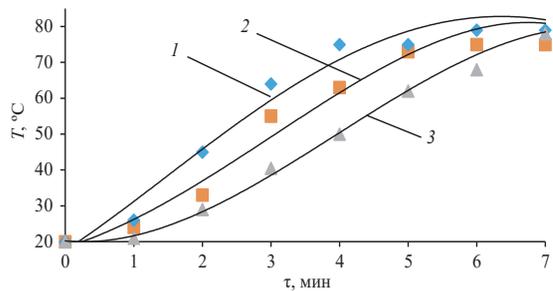


Из рис. 3 видно, что увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин при одинаковой температуре (75 °С) и 95%-й пропитке приводит к 2-кратному ускорению процесса.

На рис. 4 представлена кинетика температуры по слоям измельченной коры осины при циркуляции экстрагента с расходом 100 л/мин.

Рис. 4. Кинетическая зависимость температуры (T) по слоям коры осины при циркуляционной экстракции при высоте слоя, мм: 1 – 490; 2 – 250; 3 – 15

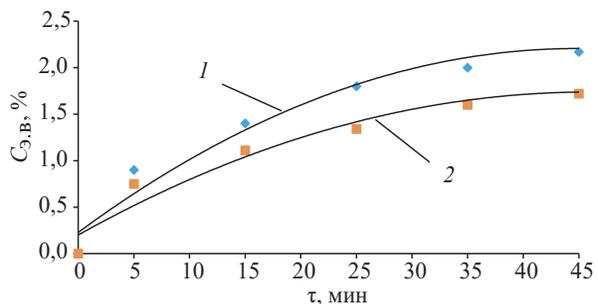
Fig. 4. The kinetic dependence of temperature (T) in layers of aspen bark during circulation extraction at layer height, mm: 1 – 490; 2 – 250; 3 – 15



Анализ зависимостей показывает, что первый слой материала быстрее достигает заданной температуры (75 °С) в отличие от последующих слоев. Наблюдаемое небольшое отставание в нагреве последующих слоев материала на 1–2 мин обусловлено тепловыми инерциями материала и особенностями теплопередачи внутри слоя. Прогрев всех слоев достигается за 7 мин.

На рис. 5 представлены кинетические кривые изменения концентрации биологически активных веществ в экстракте из коры осины и ивы при температуре 50 °С.

Рис. 5. Кинетические зависимости концентрации извлеченных экстрактивных веществ ($C_{з.в.}$) из коры в экстракте: 1 – осины; 2 – ивы
Fig. 5. The kinetic dependences of the concentration of extracted extractive substances in the extract of: 1 – aspen; 2 – willow



Исследование показывает, что максимальное извлечение биологически активных веществ происходит уже через 40–45 мин процесса. По истечении этого времени суммарный выход биологически активных веществ заметно снижается, указывая на зависимость хода экстракции от внутренних диффузионных ограничений и равновесных концентраций. Анализ кривых позволя-

ет утверждать, что объем извлеченных экстрактивных веществ из коры осины больше, чем из коры ивы.

На рис. 6 графически изображены зависимости выхода кверцетина из коры осины и ивы от концентрации экстрагента при температурах 40, 50 и 75 °С.

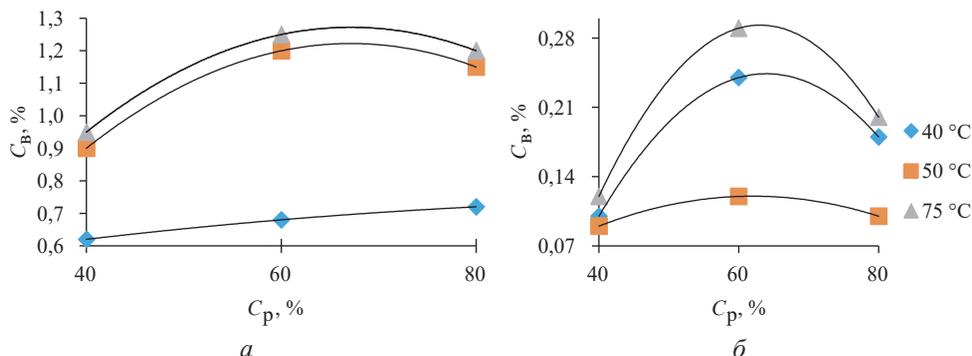


Рис. 6. Зависимость выхода кверцетина (C_b) из коры от концентрации экстрагента (C_p): а – осины; б – ивы

Fig. 6. The dependence of the yield of quercetin (C_b) from the bark on the concentration of the extractant (C_p) in: а – aspen; б – willow

Из зависимостей видно, что при экстракции коры деревьев семейства Salicaceae выход кверцетина может достигать 1,27 % а. с. в. при 60%-й концентрации этанола в растворе и температуре 50 °С. Различия в генетическом наборе и метаболизме ивы и осины могут значительно влиять на содержание кверцетина и других флавоноидов. Кора ивы и осины имеют различия в химическом составе и структуре фенольных соединений, что воздействует на их поведение при различных температурных режимах. Температурные условия играют важную роль в переходе кверцетина из сырья в экстрагент. Более низкие значения способствуют сохранению структуры флавоноидов, в то время как высокие приводят к их деструкции. Это обуславливает уменьшение выхода кверцетина. При температуре экстракции 50 °С кверцетина из осины можно получить больше, чем при 40 и 75 °С, при этой температуре создаются мягкие условия экстракции для сохранения и извлечения флавоноидов.

Кверцетин, извлекаемый из коры ивы, демонстрирует меньшую разницу в выходах при изменении температуры, чем кверцетин из коры осины. Это связано с различиями в динамике экстракции двух видов коры. Разница в составе также влияет на реактивность и протекание химических преобразований при повышенных температурах, что, в свою очередь, сказывается на конечном выходе.

На рис. 7 представлены зависимости выхода салицина из коры обоих пород от концентрации спиртового растворителя при температурах 50, 75 и 80 °С.

Анализ полученных данных показывает, что наибольший выход салицина из коры осины (0,91 % а. с. в.) наблюдается при использовании 80%-го спиртового раствора, однако при добавлении 60%-го спиртового раствора салицина из ивы (1,4 % а. с. в.) извлекается в 1,5 раза больше, чем из осины. Также резкое повышение температуры с 50 до 75 °С способствует увеличению растворимости целевых компонентов, делая процесс экстракции более эффективным. Высокая температура ускоряет молекулярную диффузию, сокращая время, необходимое для достижения равновесия в системе экстрагента и сырья.

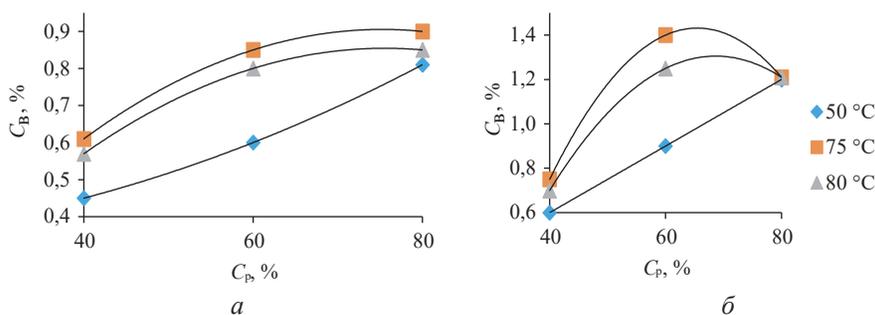


Рис. 7. Выхода салицина из коры в зависимости от концентрации экстрагента:
a – осины; *б* – ивы

Fig. 7. The yield of salicin from the bark depending on the concentration of the extractant in: *a* – aspen; *б* – willow

На рис. 8 показаны зависимости выхода кверцетина из листьев осины и ивы от концентрации экстрагента при температурах 25, 50, 75 и 80 °С.

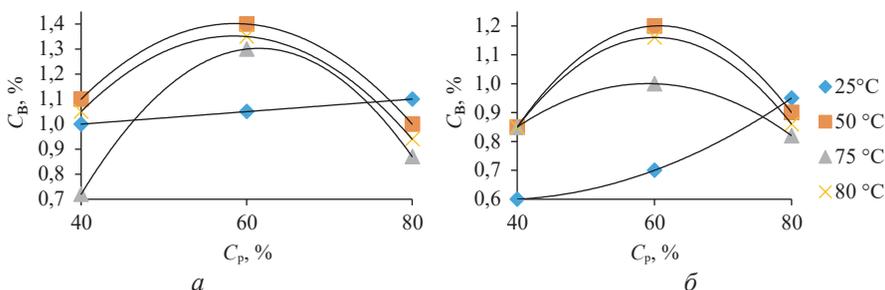


Рис. 8. Выхода кверцетина из листьев в зависимости от концентрации экстрагента:
a – осины; *б* – ивы

Fig. 8. The yield of quercetin from the leaves depending on the concentration of the extractant in: *a* – aspen; *б* – willow

Как видно по представленным данным, наибольший выход кверцетина из осины и ивы наблюдается при температуре 50 °С в случае применения 60%-го раствора этанола. Объем извлечения кверцетина из листьев осины в среднем выше, чем из листьев ивы. Также низкая концентрация экстрагента и температура менее 50 °С замедляют диффузию, что ведет к уменьшению растворимости.

На рис. 9 представлены результаты сравнительного анализа зависимости выхода салицина из листьев от температуры (25–80 °С) экстракции при продолжительности обработки 45 мин.

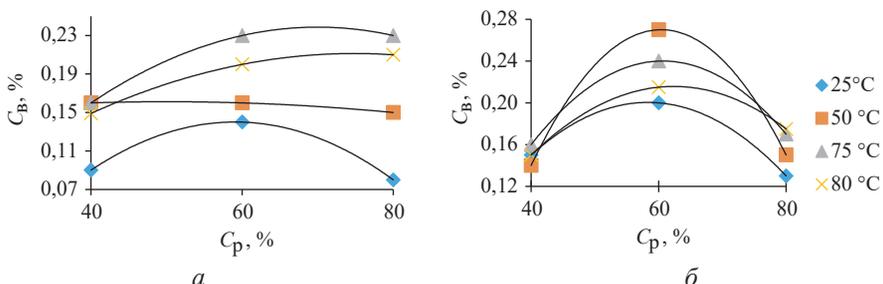


Рис. 9. Зависимость выхода салицина из листьев от концентрации экстрагента:
a – осины; *б* – ивы

Fig. 9. The dependence of the yield of salicin from the leaves on the concentration of the extractant in: *a* – aspen; *б* – willow

Анализ данных показывает, что оптимальной концентрацией экстрагента является 60%-й спиртовой раствор при температуре экстракции для осины – 75 °С, для ивы – 50 °С.

В табл. 3 приведены данные по максимальному выходу кверцетина и салицина из листьев и коры деревьев семейства ивовых.

Таблица 3

Выход кверцетина и салицина (%) из коры и листьев осины и ивы
The yield of quercetin and salicin (%) from aspen and willow bark and leaves

Вещество	Осина		Ива		Температура экстракции, °С
	кора	листья	кора	листья	
Кверцетин	1,24	1,40	0,29	1,20	50
Салицин	0,91	0,23	1,40	0,26	50, 75

Примечание: Концентрация растворителя – 60–65 %; продолжительность экстракции – 40–45 мин.

Анализ данных таблицы показывает, что:

содержание кверцетина в осине наивысшее по сравнению с ивой, при этом в листьях его больше, чем в коре, на 11,4 %;

основной объем салицина находится в коре обоих пород, но в коре ивы отмечается превышение на 35 % по сравнению с осинной;

степень извлечения кверцетина из коры и листьев осины и ивы составляет 85–89 %, а салицина – 81–82 %;

Режимные значения технологических параметров экстрагирования должны быть следующими: концентрация растворителя – 60 %; продолжительность – 40–45 мин; температура для извлечения кверцетина – 50 °С; салицина – 75 °С.

Заключение

Выявлено, что увеличение расхода экстрагента и интенсивный режим пропитки, такой, как при использовании циркуляционного потока, эффективны для улучшения скорости проникновения экстрагента в сырье и способствуют 2-кратному ускорению экстракции целевых компонентов.

По результатам экспериментов определены рациональные режимные параметры экстракции биологически активных веществ из деревьев ивы и осины: продолжительность – 40–45 мин; температура экстрагента при извлечении кверцетина – 50 °С, салицина – 75 °С; концентрация водного раствора этанола – 60 %. При переработке листьев ивы температура экстрагента при извлечении салицина и кверцетина – 50 °С.

Обнаружено, что в листьях ивы содержание кверцетина больше, чем в коре (в листьях – на 1,2 %, в коре – на 0,29 %), а салицина в листьях обеих пород в несколько раз меньше (ива – на 0,26 %, осина – на 0,23 %), чем в коре (ива – на 1,4 %, осина – на 0,91 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. СССР 986380. Способ переработки осиновой коры / Л.А. Гришкова, Е.А. Демченко, В.Е. Ковален, В.Я. Ланд, И.И. Маркичев, В.Б. Некрасова.

Grishkova L.A., Demchenko E.A., Kovalen V.E., Land V.Ya., Markichev I.I., Nekrasova V.B. *Method of Processing Aspen Bark: Author's Certificate USSR 986380.* (In Russ.).

2. Блажей А., Шутый Л. Фенольные соединения растительного происхождения. М.: Мир, 1977. 240 с.

Blazhej A., Shutyj L. *Phenolic Compounds of Plant Origin*. Moscow, Mir Publ., 1977. 240 p. (In Russ.).

3. Деметьева Т.М. Изучение коры и побегов ивы вавилонской (*Salix babylonica* L.) и гибрида ивы вавилонской и ивы белой (*Salix babylonica* L. × *Salix alba* L.), произрастающих на Северном Кавказе: дис. ... канд. фарм. Наук. Пятигорск, 2016. 154 с.

Dement'eva T.M. *Study of the Bark and Shoots of the Babylonian Willow (*Salix babylonica* L.) and the Hybrid of the Babylonian Willow and the White Willow (*Salix babylonica* L. × *Salix alba* L.), Growing in the North Caucasus*: Cand. Diss. Pharm. Sci. Diss., 2016. 154 p. (In Russ.).

4. Демченкова Е.Ю. Стандартизация лекарственного растительного сырья и фитопрепаратов на содержание антиоксидантов амперометрическим методом: автореф. дис. ... канд. фарм. наук. Москва, 2012. 25 с.

Demchenkova E.Yu. *Standardization of Medicinal Plant Raw Materials and Phytopreparations for Antioxidant Content Using the Amperometric Method*: Cand. Pharm. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2012. 25 p. (In Russ.).

5. Жматова Г.В., Нефедов А.Н., Гордеев А.С., Килимник А.В. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // Вестн. ТГТУ. 2005. Т. 11, № 3. С. 701–707.

Zhmatova G.V., Nefedov A.N., Gordeev A.S., Kilimnik A.V. Intensification Methods of Extracting Biologically Active Substances from Vegetative Raw Materials. *Vestnik TGTU = Transactions TSTU*, 2005, vol. 11, no. 3, pp. 701–707. (In Russ.).

6. Литвиненко В.И. Химия природных флавоноидов и создание препаратов при комплексной переработке растительного сырья: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Харьков: ХНИИХФИ, 1990. 29 с.

Litvinenko V.I. *Chemistry of Natural Flavonoids and Creation of Preparations During Complex Processing of Plant Raw Materials*: Doc. Chem. Sci. Diss. Abs. Kharkiv, Kharkiv Research Chemical-Pharmaceutical Institute, 1990. 29 p. (In Russ.).

7. Ломако Е.В., Кузьмичева Н.А. Применение поверхностно-активных веществ в анализе лекарственного растительного сырья, содержащего флавоноиды // Вестн. фармации. 2014. № 3(65). С. 42–49.

Lomako E.V., Kuzmichova N.A. Application of Surfactants in the Analysis of Medicinal Vegetative Raw Material Containing Flavonoids. *Vestnik farmatsii*, 2014, no. 3(65), pp. 42–49. (In Russ.).

8. Масленникова К.А., Конюхова О.М., Канарский А.В. Фенолгликозиды растений семейства Salicaceae // Вестн. Казанск. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 14. С. 383–386.

Maslennikova K.A., Konyukhova O.M., Kanarskii A.V. Phenolglycosides of Plants of the Salicaceae Family. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*, 2014, vol. 17, no. 14, pp. 383–386. (In Russ.).

9. Матвеев Е.В., Величко Н.А., Ушанов С.А., Айошина Е.Н. Математическая модель процесса экстракции древесной зелени *Juniperus sibirica* бургсд водным раствором этилового спирта // Проблемы современной аграрной науки: материалы Междунар. заоч. науч. конф. Красноярск, 2015. С. 169–174.

Matveenko E.V., Velichko N.A., Ushanov S.V., Ayoshina E.N. Mathematical Model of the Extraction Process of *Juniperus sibirica* bursgd Wood Greenery with an Aqueous Solution of Ethyl Alcohol. *Problems of Modern Agricultural Science: Proceedings of the International Correspondence Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2015, pp. 169–174. (In Russ.).

10. Пояркова Н.М., Сапарклычева С.Е. Физиологическая роль фенольных соединений // Аграрн. образование и наука. 2019. № 4. Режим доступа: <https://aes.urgau.ru/ru/4-2019/32-4-2019> (дата обращения: 20.06.25).

Poyarkova N.M., Saparklycheva S.E. The Physiological Role of Phenolic Compounds. *Agrarnoe obrazovanie i nauka = Agrarian Education and Science*, 2019, no. 4. (In Russ.).

11. Рассыпнова С.С., Турецкова В.Ф., Зверев Я.Ф. Изучение противовоспалительного действия экстракта из коры *Populus tremula* (Salicaceae) и входящих в его состав фенольных соединений // Растит. ресурсы. 2010. Т. 46, № 3. С. 103–108.

Rassypnova S.S., Turetskova V.F., Zverev Ya.F. Study of the Anti-Inflammatory Effect of *Populus tremula* (Salicaceae) Bark Extract and its Constituent Phenolic Compounds. *Rastitelnye Resursy*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 103–108. (In Russ.).

12. Сафин Р.Г., Просвирников Д.Б., Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Зиятдинова Д.Ф., Гурьянов Д.А. Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 1. С. 62–70.

Safin R.G., Prosvirnikov D.B., Arslanova G.R., Valeev K.V., Ziatdinova D.F., Guryanov D.A. Mathematical Description of the Extraction Process of Phenolic Compounds. *Derevoobrabatывaya promishlennost' = Woodworking Industry*, 2022, no. 1, pp. 62–70. (In Russ.).

13. Ушанова В.М., Лебедева О.И., Девятловская А.Н. Основы научных исследований. Ч. 2. Контроль качества и экстрагирование растительного сырья. Красноярск: СибГТУ, 2004. 168 с.

Ushanova V.M., Lebedeva O.I., Devyatlovskaya A.N. *Fundamentals of Scientific Research. Part 2. Quality Control and Extraction of Plant Raw Materials*. Krasnoyarsk, Siberian State Technological University Publ., 2004. 168 p. (In Russ.).

14. Швец П., Халабала М. Кислота ацетилсалициловая – лекарство, проверенное поколениями (к столетию ацетилсалициловой кислоты) // Словакофарма ревю. Киев, 2002. С. 66–68.

Shvets P., Khalabala M. Acetylsalicylic Acid – a Medicine Tested by Generations (on the Centenary of Acetylsalicylic Acid). *Slovakofarma reviu*. Kyiv, 2002, pp. 66–68. (In Russ.).

15. Шегельман И.Р., Кузнецов А.В. Эффективное использование лесных ресурсов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. 88 с.

Shegel'man I.R., Kuznetsov A.V. *Efficient Use of Forest Resources*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2008. 88 p. (In Russ.).

16. Jokić S., Jerković I., Rajić M., Aladić K., Bilić M., Vidović S. SC-CO₂ Extraction of *Vitex agnus-castus* L. Fruits: The Influence of Pressure, Temperature and Water Pre-soaking on the Yield and GC–MS Profiles of the Extracts in Comparison to the Essential Oil Composition. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2017, vol. 123, pp. 50–57.

<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.12.007>

17. Safina A.V., Valeev K.V., Ziatdinova D.F. Method for Determining the Mass Conductivity Coefficient of Wood when Extracting Biologically Active Substances from it. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2373, art. no. 042004.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/4/042004>

18. Safin R.G., Prosvirnikov D.B., Arslanova G.R. Parametric Multidimensional Modeling of Extraction Processes in the Wood Chemical, Food and Pharmaceutical Industries. *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Springer, Cham, 2021, pp. 286–297. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_34

19. Soares J.F., Zabot G.L., Tres M.V., Lunelli F.C., Rodrigues V.M., Friedrichc M.T., Pazinato C.A., Bilibio D., Mazutti M.A., Carniel N., Priamo W.L. Supercritical CO₂ Extraction of Black Poplar (*Populus nigra* L.) Extract: Experimental Data and Fitting of Kinetic Parameters. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2016, vol. 117, pp. 270–278.

<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.07.005>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 547.992.3:66.095.81+66.095.81.094.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-185-201

Нитрование гидролизного лигнина азотной кислотой в диметилсульфоксиде и воде

В.А. Вешняков[✉], канд. хим. наук; *ResearcherID*: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

М.Р. Ёкубжанов, аспирант; *ResearcherID*: [ACG-4269-2022](https://orcid.org/0000-0003-3084-6245),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3084-6245>

И.И. Пиковской, канд. хим. наук; *ResearcherID*: [F-4707-2018](https://orcid.org/0000-0002-6149-6770),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6149-6770>

Ю.Г. Хабаров, д-р хим. наук, проф.; *ResearcherID*: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; viacheslav.veshnyakov@mail.ru[✉], cool.mominjon@mail.ru, i.pikovskoj@narfu.ru, khabarov.yu@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.25 / Одобрена после рецензирования 15.04.25 / Принята к печати 16.04.25

Аннотация. Гидролизный лигнин является побочным продуктом, представляющим собой нерастворимый остаток, формирующийся после гидролиза полисахаридов лигноцеллюлозных материалов с целью дальнейшей переработки получаемых моносахаридов в биоэтанол или другие продукты. Гидролизный лигнин в отличие от других технических лигнинов нерастворим в воде и органических растворителях, а также содержит негидролизованную целлюлозу, экстрактивные и минеральные вещества. Поиск путей рационального применения этого побочного продукта для производства химикатов является актуальной задачей, решение которой повысит экономическую привлекательность технологии целлюлозного биоэтанола. В данной работе исследовано нитрование гидролизного лигнина азотной кислотой в смеси с диметилсульфоксидом и без него при нагревании, позволяющее перевести лигнинную часть в растворимые в воде продукты при подщелачивании. Лигнин Класона был использован в качестве модели гидролизного лигнина, не содержащего целлюлозной составляющей. При помощи электронной спектроскопии осуществляли контроль образования водорастворимых продуктов из лигнина, причем водорастворимые продукты подвергались деградации в реакционной смеси. Для лигнина Класона был подобран состав смеси растворитель–азотная кислота, способствующий сохранению структуры лигнина. По массам остатков при нитровании гидролизного лигнина построены кинетические зависимости хода его делигнификации и рассчитаны наблюдаемые константы скоростей через описание процесса кинетическими уравнениями 1-го порядка при 60...100 °С. Энергии активации делигнификации гидролизного лигнина в случае применения диметилсульфоксида как соразтворителя и без него составили соответственно 96 и 86 кДж/моль. При нитровании гидролизного лигнина образовались водорастворимые продукты, содержавшие по 3 фракции со следующими молекулярными массами: менее 10³, 10³...10⁴ и более 10⁴ г/моль. При этом в процессе нитрования содержание последней фракции снижалось за счет деполимеризующего действия азотной кислоты. Увеличение доли азотной кислоты в смеси приводило к более сильной деполимеризации макромолекул лигнина, в результате чего у продуктов нитрования гидролизного лигнина отсутствовала фракция

© Вешняков В.А., Ёкубжанов М.Р., Пиковской И.И., Хабаров Ю.Г., 2025

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

более 10^4 г/моль, а 2 фракции с меньшими молекулярными массами смещались в сторону низкомолекулярных значений.

Ключевые слова: лигнин, гидролизный лигнин, лигнин Класона, окислительное нитрование, диметилсульфоксид, деполимеризация, делигнификация, кинетика

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств Программы развития САФУ на 2021–2035 гг., договор Д-384.2024, с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Вешняков В.А., Ёкубжанов М.Р., Пиковской И.И., Хабаров Ю.Г. Нитрование гидролизного лигнина азотной кислотой в диметилсульфоксиде и воде // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 185–201. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-185-201>

Original article

Nitration of Hydrolysis Lignin with Nitric Acid in Dimethyl Sulfoxide and Water

Viacheslav A. Veshnyakov[✉], Candidate of Chemistry; ResearcherID: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

Muminjon R. Yokubjanov, Postgraduate Student; ResearcherID: [ACG-4269-2022](https://orcid.org/0000-0003-3084-6245),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3084-6245>

Ilya I. Pikovskoi, Candidate of Chemistry; ResearcherID: [F-4707-2018](https://orcid.org/0000-0002-6149-6770),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6149-6770>

Yuriy G. Khabarov, Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; viacheslav.veshnyakov@mail.ru[✉], cool.mominjon@mail.ru, i.pikovskoj@narfu.ru, khabarov.yu@mail.ru

Received on February 21, 2025 / Approved after reviewing on April 15, 2025 / Accepted on April 16, 2025

Abstract. Hydrolysis lignin is a by-product which is an insoluble residue formed after the hydrolysis of polysaccharides of lignocellulosic materials for further processing of the resulting monosaccharides into bioethanol or other products. Hydrolysis lignin, unlike other technical lignins, is insoluble in water and organic solvents, and also contains non-hydrolysed cellulose, extractive and mineral substances. Finding ways to rationalize the use of this by-product for the production of chemicals is an urgent task, the solution to which will increase the economic attractiveness of the cellulosic bioethanol technologies. In this work, the nitration of hydrolysis lignin with nitric acid in a mixture with and without dimethyl sulfoxide during heating has been investigated, which allows the lignin part to be converted into water-soluble products upon alkalization. Klason lignin has been used as a model of hydrolysis lignin that does not contain a cellulose component. Using electron spectroscopy, the formation of water-soluble products from lignin has been monitored, and the water-soluble products have been subject to degradation in the reaction mixture. For Klason lignin, a solvent-nitric acid mixture composition has been selected, which allows preserving the structure of lignin. Based on the mass values of residues during nitration of hydrolysis lignin, kinetic dependences of the course of its delignification have been constructed and the observed rate constants have been calculated by describing the process using 1st-order kinetic equations at 60...100 °C. The activation

energies of the delignification of hydrolysis lignin in the case of using dimethyl sulfoxide as a co-solvent and without it have been 96 and 86 kJ/mol, respectively. Upon nitration of hydrolysis lignin, water-soluble products have been formed, containing 3 fractions with the following molecular mass values: less than 10^3 , $10^3 \dots 10^4$ and more than 10^4 g/mol. In this case, during the nitration process, the content of the last fraction has decreased due to the depolymerizing effect of nitric acid. An increase in the proportion of nitric acid in the mixture has led to a stronger depolymerization of lignin macromolecules, as a result of which the nitration products of hydrolysis lignin have lacked a fraction of more than 10^4 g/mol, and the 2 fractions with lower molecular mass values have shifted towards low molecular mass values.

Keywords: lignin, hydrolysis lignin, Klason lignin, oxidative nitration, dimethyl sulfoxide, depolymerization, delignification, kinetics

Acknowledgements: The research was carried at the expense of the NArFU Development Program for 2021–2035, contract D-384.2024, using the equipment of the Center for Collective Use of Scientific Equipment “Arktika” of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

For citation: Veshnyakov V.A., Yokubjanov M.R., Pikovskoi I.I., Khabarov Yu.G. Nitration of Hydrolysis Lignin with Nitric Acid in Dimethyl Sulfoxide and Water. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 185–201. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-185-201>

Введение

Устойчивое развитие в части рационального природопользования имеет тенденцию к переходу от ископаемого углеродного к возобновляемому растительному сырью [23], в т. ч. в энергетическом плане [17]. С начала XXI в. в развитых и некоторых развивающихся странах начался бурный рост производства этилового спирта из биомассы растений (биоэтанола) для использования в качестве компонента моторных топлив [30]. Получение биоэтанола 2-го поколения, основа которого – непищевое растительное сырье, ограничено из-за особенностей строения лигноцеллюлозной биомассы и большей сложности технологий ее переработки, но, тем не менее, перспективно [12]. В качестве побочного продукта при этом остается гидролизный лигнин (ГЛ), который утилизируют в основном сжиганием. В СССР была широко развита гидролизная промышленность, производившая помимо этилового спирта кормовые дрожжи, фурфурол и другие продукты из отходов лесопиления и деревообработки. Однако ГЛ тогда рассматривался как отход и вывозился в отвалы – в них накоплены десятки миллионов тонн ГЛ [24]. Вопросы утилизации ГЛ из отвалов для исследователей из стран бывшего СССР всегда имели актуальность с экологической точки зрения, сегодня же ГЛ, как и другие технические лигнины, привлекает внимание многих ученых во всем мире, ищущих пути валоризации данного вида отходов, в т. ч. повышения экономической привлекательности производства биоэтанола 2-го поколения [26].

ГЛ в неизменном виде был исследован, например, в качестве удобрений [1], сорбентов радионуклидов [7]. Путем химической модификации ГЛ могут быть получены сорбенты с улучшенными сорбционными свойствами [18, 19]. ГЛ часто рассматривается как сырье для изготовления углеродных сорбентов [8, 14] и электродных материалов [22]. ГЛ преобразуем в низкомолекулярные соединения пиролизом, гидрогенолизом, гидротермальной или органосольвентной обработкой [21]. Деполимеризация ГЛ с извлечением растворимых продук-

тов также может быть проведена при использовании щелочи [20], пероксида водорода [5], азотной кислоты [10, 11].

Нитрование лигнина в водной среде, в присутствии воды сопровождается его окислением с уменьшением содержания метоксильных групп и увеличением количества карбоксильных групп [4, 6], а также деполимеризацией, обеспечивающих растворение лигнина в воде [10, 11, 13]. Как известно, продукты нитрования лигнина хорошо растворяются в щелочах [6], что используется при делигнификации лигноцеллюлозных материалов азотной кислотой с последующей щелочной экстракцией для растворения продуктов нитрования лигнина [4, 15].

Исследованиями нитрования ГЛ, выполненными Д.Е. Лахмановым, было установлено, что лигнин Класона (ЛК) и ГЛ полностью превращаются в водорастворимые в кислой среде продукты за 15...20 мин обработки смесями диметилсульфоксид (ДМСО)–азотная кислота и диоксан–азотная кислота в соотношении 4:1 по объему [10]. В этой работе использовали ДМСО как соразтворитель при нитровании ГЛ с последующим подщелачиванием реакционной смеси для растворения образующихся из лигнина продуктов.

Цель – изучение нитрования ГЛ смесями концентрированной азотной кислоты с ДМСО (ДМСО– HNO_3) или водой (H_2O – HNO_3) с дальнейшим растворением продуктов нитрования лигнина в щелочи для их перевода в водный раствор с определением кинетических параметров процесса делигнификации и молекулярно-массовых характеристик продуктов.

Объекты и методы исследования

Реактивы и материалы. При проведении экспериментов были использованы следующие реактивы: HNO_3 (х.ч., 65 %), NaOH (ч.д.а), ДМСО (х.ч.), толуол (ч.д.а.), H_2SO_4 (х.ч., 94 %), этанол (ректификат, 95 %). Исследование выполняли на образце ГЛ Кировского биохимического завода с производственной линии, который предварительно отмывали горячей водой, высушивали на воздухе, измельчали (использовали фракцию не более 1 мм) и обессмоливали экстракцией в аппарате Сокслета смесью спирт–толуол (1:2 по объему). Часть экспериментов осуществлена с образцом ЛК, выделенного из обессмоленных опилок еловой древесины (фракция 0,25...0,5 мм). Содержание в ГЛ (обессмоленном) ЛК – 80,0±0,5 %, золы – 1,1±0,3 %, элементный состав, %: С – 63,4; Н – 6,65; N – 0,1; S – 0,15.

Методика обработки образца лигнина азотной кислотой. Навеску воздушно-сухого образца лигнина (ГЛ или ЛК) массой 0,1 г помещали в градуированную пробирку вместимостью 25 мл, добавляли 1 мл смеси ДМСО– HNO_3 или H_2O – HNO_3 различного соотношения (по объемам при смешении). Реакционную смесь нагревали с обратным холодильником на кипящей водяной бане или в термостате при заданной температуре. После нагревания в пробирку добавляли 10 мл 1 М раствора NaOH , доводили водой до 25 мл и фильтровали через обеззоленный бумажный фильтр, промывая осадок водой. Для записи электронных спектров фильтрат собирали в мерную колбу вместимостью 50 мл, доводили водой до метки, после чего дополнительно разбавляли в 50 раз.

Для определения кинетических параметров делигнификации ГЛ исследовали переход лигнинной части ГЛ в растворимую форму. Для этого проводили

обработку ГЛ, как указано выше. Для фильтратов после разбавления строили зависимости оптической плотности при 280 нм от продолжительности нагревания. Осадки после фильтрования сушили при 105 °С до постоянной массы, по результатам взвешивания строили зависимости выхода осадка относительно исходной массы ГЛ (w , %) от продолжительности нагревания реакционной смеси. Затем пересчитывали эти значения в количество лигнина относительно исходного содержания ЛК в ГЛ (L , %) в данный момент проведения реакции. При необходимости отсекали индукционные периоды и строили зависимости натурального логарифма L от времени на активных участках кинетических кривых. По уравнениям линий тренда определяли константы наблюдаемых скоростей делигнификации ГЛ при различных температурах. Для нахождения энергий активации делигнификации ГЛ в среде ДМСО–HNO₃ и H₂O–HNO₃ были установлены зависимости натурального логарифма скоростей делигнификации от обратной термодинамической температуры и по тангенсу угла наклона прямой рассчитана энергия активации в соответствии с уравнением Аррениуса.

Методика записи электронных спектров. Электронные спектры растворов записывали на спектрофотометре UV-1650PC Shimadzu (Япония) или UV-1900i Shimadzu (Япония) в кварцевых кюветах с толщиной рабочего слоя 1 см относительно воды в диапазоне длин волн 200...500 нм.

Методика записи ИК-спектров. ИК-спектры фиксировали в диапазоне волновых чисел 4000...400 см⁻¹ на ИК-Фурье спектрофотометре FTIR-8400 S Shimadzu (Япония) с помощью приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО, или ATR) MIRacle™ Pike Technologies (США), призма – селенид цинка, число сканирований – 128. Перед измерениями прописывали базовую линию. ИК-спектры представлены в виде ATR-спектров.

Методика определения элементного состава. Элементный состав устанавливали на CHNS анализаторе EA-3000 EuroVector (Италия).

Методика определения молекулярно-массовых характеристик. Молекулярные массы получали методом гель-фильтрационной эксклюзионной хроматографии с использованием ВЭЖХ-системы LC-20 Prominence Shimadzu (Япония), состоящей из автодозатора SIL-20A, 2-плунжерного насоса LC-20AD, вакуумного дегазатора DGU-A3, термостата колонок STO-20A, спектрофотометрического детектора SPD-20A. Разделение компонентов проводили на колонке для анализа полимеров MCX 300×8 мм с размером пор 1000+10000 Å PSS (Германия) при температуре 40 °С, скорость потока подвижной фазы – 1,0 мл/мин, объем вводимой пробы – 20 мкл, продолжительность анализа – 30 мин, детектирование – при 280 нм, элюент – 0,05 М водный раствор NaOH. Градуировку системы проводили по полистиролсульфонату натрия PSS (Германия) с молекулярными массами 800...150·10³ г/моль при концентрации 1 мг/мл в 0,05 М водном растворе NaOH. Аналит разбавляли 0,05 М водным раствором NaOH, фильтровали через шприцевой фильтр и вводили необходимый объем в хроматографическую систему.

Результаты исследования и их обсуждение

Подбор условий нитрования лигнина Класона. ЛК был выбран в качестве модели лигнина ГЛ, т. к. ЛК в отличие от ГЛ не содержит полисахаридов. Ранее было установлено [10], что в результате обработки ЛК смесями 1,4-диок-

сан- HNO_3 и DMCO-HNO_3 соотношения 4:1 по объему через 15 мин нагревания он полностью переходил в продукты, которые растворялись в реакционной смеси. Поэтому в данном исследовании для подбора условий нитрования ЛК использовали смеси DMCO-HNO_3 при различных соотношениях компонентов, а нагревание на кипящей водяной бане проводили в течение 10 мин, чтобы иметь возможность отделить нерастворенную часть (остаток) продуктов обработки. В данном случае реакционную смесь не подщелачивали после нагревания, а сразу разбавляли водой, т. е. раствор оставался кислым. Нерастворимую в кислой среде часть отфильтровывали, промывали водой и сушили до постоянной массы с помощью анализатора влажности MA 35 Sartorius (Германия). Выход кислотонерастворимой части (рис. 1) повышался с увеличением содержания DMCO и, соответственно, с уменьшением количества азотной кислоты в реакционной смеси. Рост концентрации азотной кислоты в реакционной смеси приводил к более глубокой деградации лигнина до водорастворимых продуктов за счет деполимеризации и окисления. Таким образом, часть продуктов нитрования ЛК становилась кислоторастворимой, а другая оставалась кислотонерастворимой. Как видно из рис. 1, при соотношениях смеси DMCO-HNO_3 от 4:1 до 6:1 выход кислотонерастворимых продуктов оказывался примерно на одном уровне – около 85 %, что объясняется незначительным изменением объемной доли DMCO в реакционной смеси с 80 до 86 %.

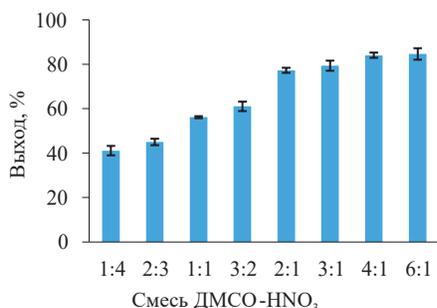


Рис. 1. Выход кислотонерастворимых продуктов при обработке ЛК в условиях температуры 100 °С в течение 10 мин смесями DMCO-HNO_3 в различных соотношениях

Fig. 1. The yield of acid-insoluble products during the treatment of Klason lignin at a temperature of 100 °C for 10 min with DMSO-HNO_3 mixtures in various ratios

При подщелачивании раствором гидроксида натрия реакционных смесей после обработки ЛК при 100 °С в течение 10 мин смесями DMCO-HNO_3 весь ЛК растворялся, т. е. продукты были полностью растворимы в щелочной среде, что характерно для нитрованных лигнинов [4]. На рис. 2 представлены электронные спектры щелочных растворов реакционных смесей и фильтратов, подщелоченных после отделения кислотонерастворимых продуктов, а также вклад кислоторастворимых и кислотонерастворимых частей в поглощение при 280 нм их щелочных растворов. Как видно из электронных спектров щелочных растворов реакционных смесей, в которых присутствовали как кислоторастворимые, так и кислотонерастворимые продукты, характерная для лигнинов полоса поглощения при 280 нм уменьшалась при увеличении количества азотной кислоты в смеси с DMCO . Это также подтверждает деградацию лигнина под действием азотной кислоты, а образующиеся вещества становятся все более растворимыми в кислой среде. Например, для смесей DMCO-HNO_3 при соотношении компонентов 4:1 и 6:1 на спектрах реакционных смесей хорошо различима полоса поглощения при 280 нм в виде плеча, указывающая на присутствие ароматических структур, свойственных для лигнина [25].

С другой стороны, при использовании смеси ДМСО–HNO₃ 1:4 на спектрах в форме небольших плеч присутствуют полосы поглощения примерно при 300 и 350 нм, характерные для ароматических структур лигнина с сопряженными карбонильными группами [25], что подтверждает окисление лигнина в этих условиях. Соответственно, с увеличением количества азотной кислоты в реакционной смеси в фильтраты переходит больше продуктов, растворимых в кислой среде, поэтому интенсивность поглощения в исследованной области у них выше. На рис. 2 также показан вклад в общее поглощение щелочных растворов при 280 нм кислотонерастворимых и кислоторастворимых продуктов (фильтратов). При этом доля первых (на столбиках диаграммы показаны значения в процентах от общего поглощения при 280 нм) в целом коррелирует с их массами, представленными на рис. 1.

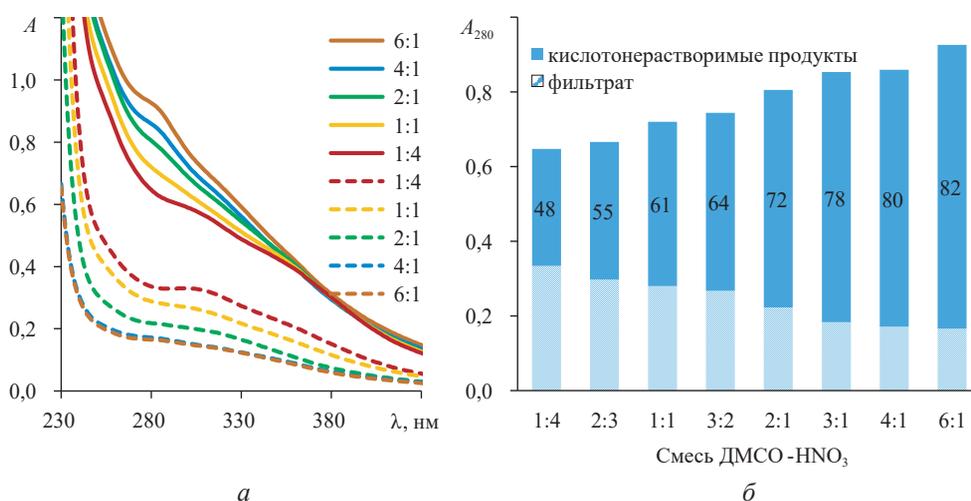


Рис. 2. Электронные спектры (а) щелочных растворов реакционных смесей (сплошные линии) и фильтратов (пунктирные линии), подщелоченных после отделения кислотонерастворимых продуктов, а также вклад в общее поглощение (б) щелочных растворов кислотонерастворимых и кислоторастворимых продуктов/фильтратов после обработки ЛК при 100 °С в течение 10 мин смесями ДМСО–HNO₃ в различных соотношениях

Fig. 2. The electronic spectra (a) of alkaline solutions of reaction mixtures (solid lines) and filtrates (dashed lines) alkalized after separation of acid-insoluble products, as well as the contribution to the total absorption (b) of alkaline solutions of acid-insoluble and acid-soluble products/filtrates after the treatment of Klason lignin at 100 °C for 10 min with DMSO–HNO₃ mixtures in various ratios

Некоторые кислотонерастворимые продукты были проанализированы с помощью ИК-спектроскопии и элементного анализа, для этого их выделяли в специальной серии с высушиванием на воздухе. На рис. 3 приведены ИК-спектры исходного ЛК и кислотонерастворимых продуктов его обработки смесями ДМСО–HNO₃ в соотношении 4:1 и 3:2. Для других соотношений смесей (1:1, 3:2 и 1:4) ИК-спектры продуктов были практически такими же, как и для представленного на рис. 3 продукта (при соотношении компонентов смеси 3:2), что указывает на близкое строение этих кислотонерастворимых образцов. Увеличение концентрации азотной кислоты в реакционной смеси приводит к более глубокой деградации ЛК с растворением получаемых при нитровании лигнина веществ.

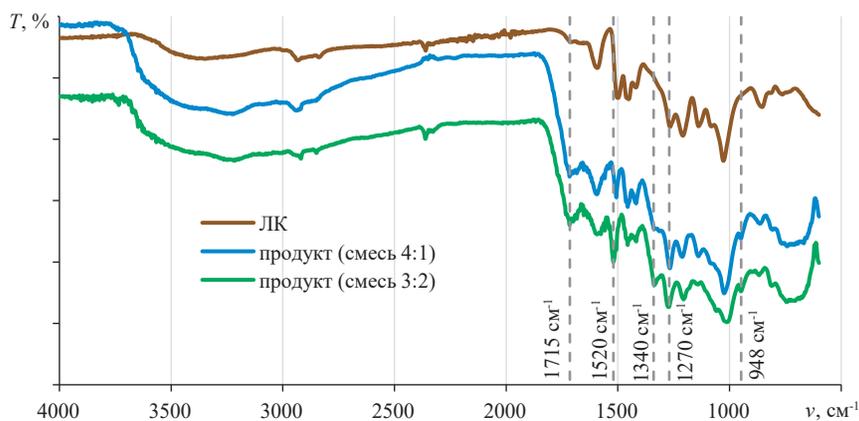


Рис. 3. ИК-спектры ЛК и кислотонерастворимых продуктов его обработки при 100 °С в течение 10 мин смесью ДМСО–HNO₃ в различных соотношениях

Fig. 3. The IR spectra of Klason lignin and acid-insoluble products of its treatment at 100 °C for 10 min with DMSO–HNO₃ mixture in various ratios

Исходный ЛК имеет ИК-спектр с характерными для лигнинов полосами поглощения [16]: 3500...3100 см⁻¹ (ОН-группы), 2920...2930 и 2850 см⁻¹ (С–Н-связи CH₃-, CH₂- и OCH₃-групп), плечо 1715 с 1650 см⁻¹ (C=O), 1595 и 1500 см⁻¹ (ароматические кольца), 1458 см⁻¹ (С–Н-связи CH₃-, CH₂-групп), 1417 см⁻¹ (С=C-связи с С–Н-связями ароматических колец), 1267 см⁻¹ (гвацильные кольца), 1208 см⁻¹ (С–С- с С–О- и С=О-связями), 1138 см⁻¹ (С–Н-связи гвацильных колец), плечо 1082 см⁻¹ (С–О-связи вторичных спиртов), 1025 см⁻¹ (С–Н-связи ароматических колец с С–О-связями первичных спиртов и простых эфирных групп), 853 см⁻¹ (С–Н-связи ароматических колец).

На ИК-спектрах кислотонерастворимых продуктов обработки ЛК (рис. 3) есть новые или более интенсивные полосы поглощения: 1715 см⁻¹ (С=О-связи СО- и СООН-групп), 1520 и 1340 см⁻¹ (N–О-связи нитро-групп), 1270 см⁻¹ (С–О-связей СООН-групп), 948 см⁻¹ (О–Н-связи СООН-групп) [27, 28]. Это свидетельствует о том, что наряду с нитрованием происходит и окисление ЛК азотной кислотой. При этом для смеси ДМСО–HNO₃ в соотношении 4:1 у продукта полоса 1520 см⁻¹ почти не видна, она перекрыта полосой 1500 см⁻¹ валентных колебаний ароматических колец, а полоса 1340 см⁻¹ присутствует в виде плеча. При повышении содержания азотной кислоты в смеси с ДМСО на спектрах кислотонерастворимых продуктов полосы валентных колебаний нитро-групп при 1520 и 1340 см⁻¹ являются более интенсивными, что указывает на превосходящую глубину нитрования ЛК. Кроме того, более глубокое нитрование ЛК также подтверждают данные элементного анализа кислотонерастворимых продуктов, полученных при использовании смесей ДМСО–HNO₃ составов 4:1 и 1:1, соответственно, %: С – 54,6 и 50,5; Н – 5,70 и 5,39; N – 4,71 и 5,59; S – 0,13 и 0,15 (элементный состав исходного ЛК, %: С – 66,2; Н – 7,04; N – 0,1; S – 0,14). Следовательно, при использовании смеси ДМСО–HNO₃ при соотношении компонентов 4:1 нитрование и деградация ЛК происходят в меньшей степени. При этом за счет окисления и деполимеризации ЛК образующиеся продукты полностью растворимы в щелочной среде.

Кинетические исследования. Кинетические исследования проводили на образце промышленного ГЛ, из которого были удалены экстрактивные веще-

ства, а содержание остаточных полисахаридов составляло 20 %. Для нитрования ГЛ использовали смесь ДМСО– HNO_3 в соотношении 4:1, т. к. в этом случае происходила минимальная деградация лигнина в отличие от смесей с большим содержанием азотной кислоты. Кроме того, было обнаружено, что при замене ДМСО на воду в смеси с азотной кислотой при нитровании ГЛ образующиеся продукты также полностью растворялись при подщелачивании, а в остатке сохранялась полисахаридная часть ГЛ. В кинетических экспериментах отделяли нерастворившуюся долю для определения ее массы, а щелочные фильтраты спектрофотометрировали. На рис. 4 и 5 приведены соответственно зависимости оптической плотности при 280 нм щелочных растворов продуктов нитрования ГЛ и выходы нерастворившихся остатков от продолжительности нагревания при 60...100 °С (точки при 20, 40 и 60 °С являются средними значениями из 2 повторений, остальные точки выполнены без повторений).

Анализ рис. 4 позволяет заключить, что в обоих случаях при 100 °С в щелочной раствор быстро переходили продукты нитрования ГЛ, достигая максимума через 2 мин реакции. За это время (рис. 5) весь лигнин из ГЛ выделялся в раствор, и масса остатка переставала уменьшаться, его количество соответствовало содержанию полисахаридов в образце ГЛ после удаления экстрактивных веществ. Продолжение такой обработки сопровождалось деградацией лигнина, т. к. поглощение фильтратов при 280 нм снижалось.

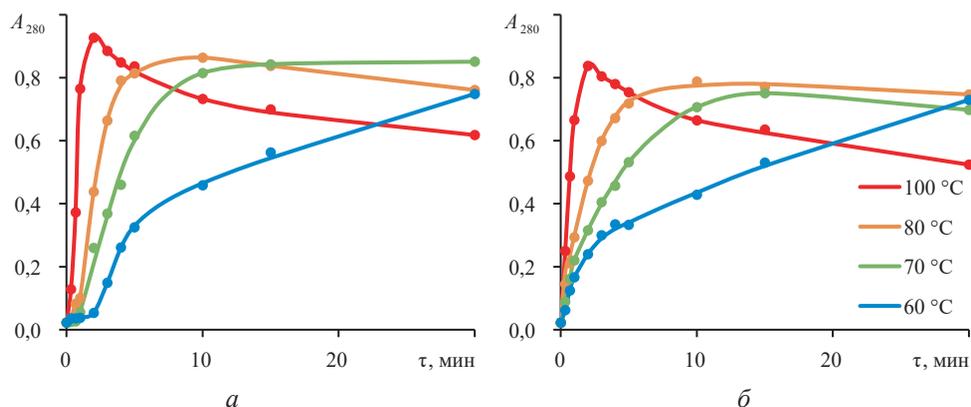


Рис. 4. Кинетические зависимости нитрования ГЛ смесями ДМСО– HNO_3 (а) и H_2O – HNO_3 (б) при соотношении компонентов 4:1 и различных температурах реакции

Fig. 4. The kinetic dependences of hydrolysis lignin nitration with DMSO– HNO_3 (a) and H_2O – HNO_3 (b) mixtures at a component ratio of 4:1 and different reaction temperatures

Следовательно, приводящие к растворению деполимеризация и окисление лигнина протекают одновременно. Снижение температуры обработки сопровождалось уменьшением скоростей деполимеризации и окисления, обеспечивающих растворение лигнина, а также замедлением его деградации, потому что оптические плотности при 280 нм оказались больше, чем при 100 °С, для 80 и 70 °С уже на 10-й минуте, а при 60 °С – на 30-й минуте. При 80 °С в течение первых 10 минут происходило полное растворение лигнина в случаях использования смеси как ДМСО– HNO_3 , так и H_2O – HNO_3 (рис. 5).

Особенностью обработки ГЛ смесью ДМСО– HNO_3 оказалось наличие более длительных индукционных периодов, увеличивающихся со снижением температуры реакции. При 100 °С индукционный период в варианте использования смеси ДМСО– HNO_3 менее заметен, однако оптические плотности при

280 нм в первые 20 и 40 с были меньше, чем в варианте со смесью $\text{H}_2\text{O}-\text{HNO}_3$. Это, возможно, связано с тем, что в случае применения смеси $\text{DMCO}-\text{HNO}_3$ окисление происходит в меньшей степени, т. е. растворимые в щелочи продукты образуются медленнее. Возможно, в водной среде растворение лигнина ГЛ протекает в первую очередь за счет деполимеризации более доступных «поверхностных» слоев лигнина. При использовании DMCO , вероятно, проникновение реагентов в матрицу ГЛ глубже.

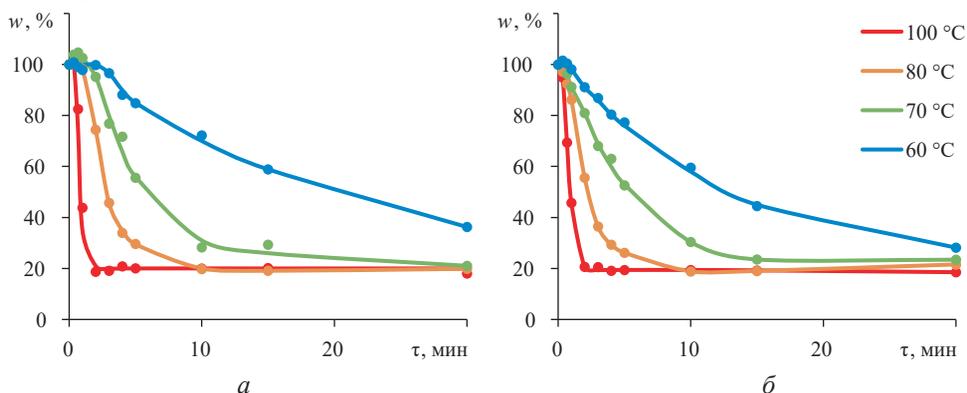


Рис. 5. Кинетические зависимости делигнификации ГЛ смесями $\text{DMCO}-\text{HNO}_3$ (а) и $\text{H}_2\text{O}-\text{HNO}_3$ (б) при соотношении компонентов 4:1 и различных температурах реакции
Fig. 5. The kinetic dependences of hydrolysis lignin delignification with $\text{DMSO}-\text{HNO}_3$ (a) and $\text{H}_2\text{O}-\text{HNO}_3$ (b) mixtures at a component ratio of 4:1 and different reaction temperatures

Таким образом, кинетическое описание накопления растворимых в щелочи продуктов, по результатам спектрофотометрии, осложняется их деградацией и изменением спектров. Для кинетических расчетов использовали зависимости количества лигнина относительно его исходного содержания в ГЛ в данный момент времени от продолжительности реакции, т. е. изучали делигнификацию ГЛ, без анализа процессов деполимеризации и деградации самого лигнина. Для определения констант скоростей реакций делигнификации были построены зависимости $\ln(L)$ от продолжительности (рис. 6), т. к. обычно делигнификацию описывают кинетическим уравнением 1-го порядка [9, 20].

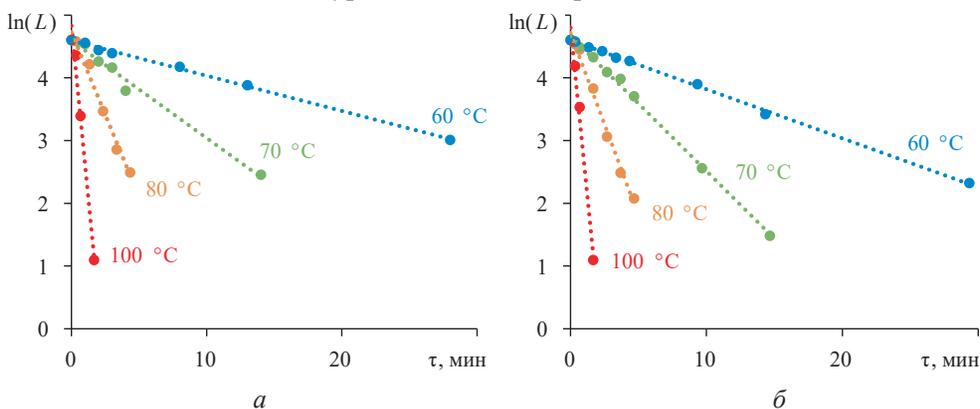


Рис. 6. Кинетические кривые делигнификации ГЛ смесями $\text{DMCO}-\text{HNO}_3$ (а) и $\text{H}_2\text{O}-\text{HNO}_3$ (б) при соотношении компонентов 4:1 и различных температурах
Fig. 6. The kinetic curves of hydrolysis lignin delignification with $\text{DMSO}-\text{HNO}_3$ (a) and $\text{H}_2\text{O}-\text{HNO}_3$ (b) mixtures at a component ratio of 4:1 and different temperatures

При построении этих зависимостей индукционные периоды были отсечены. Как видно из рис. 6, кинетические кривые делигнификации ГЛ в исследованных условиях хорошо описываются уравнениями кинетики 1-го порядка. Рассчитанные наблюдаемые константы скоростей делигнификации и коэффициенты парной корреляции уравнений построенных зависимостей $\ln(L)$ от продолжительности нагревания (с отсеченными индукционными периодами) представлены в табл. 1. Наблюдаемые константы скоростей делигнификации ГЛ при использовании смеси H_2O-HNO_3 оказались немного больше при 60...80 °С, чем для случая смеси $DMCO-HNO_3$. Рис. 5 показывает, кинетические зависимости при 70...100 °С очень похожи, а при 60 °С делигнификация смесью $DMCO-HNO_3$ идет несколько медленнее, чем смесью H_2O-HNO_3 . Это, вероятно, говорит об изменении или замедлении скорости лимитирующего процесса делигнификации при понижении температуры в варианте опыта со смесью $DMCO-HNO_3$ в отличие от варианта H_2O-HNO_3 .

Таблица 1

Наблюдаемые константы скоростей делигнификации ГЛ
The observed rate constants of hydrolysis lignin delignification

Температура, °С	$DMCO-HNO_3$			H_2O-HNO_3		
	индукционный период*, с	k_1 , мин ⁻¹	R ²	индукционный период*, с	k_1 , мин ⁻¹	R ²
60	120	0,056	0,998	40	0,078	0,999
70	60	0,155	0,995	20	0,215	0,998
80	40	0,525	0,983	20	0,582	0,991
100	20	2,201	0,984	20	2,165	0,988

*Указанные индукционные периоды были исключены при построении кинетических зависимостей 1-го порядка; k_1 – наблюдаемые константы скоростей.

Рассчитанные энергии активации оказались равными соответственно 96 и 86 кДж/моль при использовании смесей $DMCO-HNO_3$ и H_2O-HNO_3 . При этом экспериментальные значения равны энергиям активации делигнификации древесины и соломы растворителями или меньше этих показателей и были больше, чем в случае щелочной делигнификации и делигнификации диоксидом хлора [20]. Высокие значения для азотной кислоты говорят, вероятно, о более конденсированной и потому менее активной структуре лигнина ГЛ в отличие от лигнина древесины или соломы. Так, например, при делигнификации гидролизного лигнина (после гидролиза рисовой соломы) гидроксидом натрия в смеси этиленгликоль–вода вторая, более медленная, заключительная стадия извлечения лигнина характеризуется энергией активации 93,9 кДж/моль, авторы [20] предполагают, что это связано с расщеплением С–С-связей остаточного лигнина. Кроме того, энергии активации, равные соответственно 82 и 93 кДж/моль, были характерны для делигнификации азотной кислотой древесины березы при извлечении остаточных 50 и 30 % лигнина, что объясняется меж- и внутриглобулярной диффузиями [3]. При этом в случае щелочной экстракции после делигнификации азотной кислотой происходит усреднение всех влияющих факторов, в результате чего энергия активации оказывается равна 71 кДж/моль [2]. Так как в ГЛ лигноуглеводная матрица нарушена по сравнению с исходной древесиной за счет удаления при гидролизе гемицеллюлоз и аморфной части целлюлозы, то предпочтительным кажется объяснение значительных

энергий активации делигнификации ГЛ более конденсированной структурой лигнина в первую очередь и лишь затем диффузионными явлениями.

Молекулярно-массовые характеристики. Молекулярно-массовое распределение (ММР) устанавливали для щелочных растворов продуктов обработки ГЛ смесями ДМСО–HNO₃ и H₂O–HNO₃ при соотношении компонентов 4:1 и температуре 100 °С в течение 2, 10 и 30 мин. Полученные кривые ММР образующихся продуктов представлены на рис. 7, а рассчитанные по ним среднечисловая (M_n), среднемассовая (M_w) и z-средняя (M_z) молекулярные массы, а также индекс полидисперсности ($D = M_w/M_n$) сведены в табл. 2.

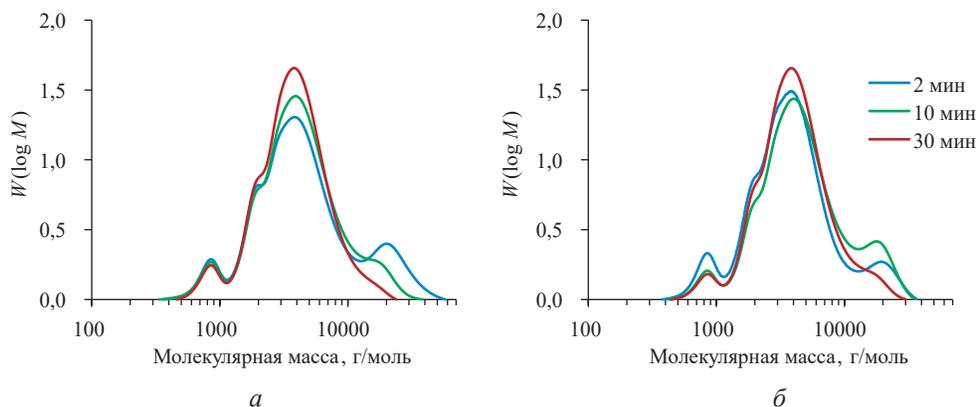


Рис. 7. ММР продуктов нитрования ГЛ при 100 °С смесями ДМСО–HNO₃ (а) и H₂O–HNO₃ (б) в соотношении 4:1 в зависимости от продолжительности нагревания

Fig. 7. The molecular mass distribution of hydrolysis lignin nitration products at 100 °С with DMSO–HNO₃ (a) and H₂O–HNO₃ (b) mixtures in a ratio of 4:1 depending on the heating duration

Таблица 2

Молекулярно-массовые характеристики продуктов нитрования ГЛ смесями ДМСО–HNO₃ и H₂O–HNO₃ при 100 °С

The molecular mass characteristics of hydrolysis lignin nitration products with DMSO–HNO₃ and H₂O–HNO₃ mixtures at 100 °С

Параметр	Продолжительность обработки, мин					
	ДМСО–HNO ₃			H ₂ O–HNO ₃		
	2	10	30	2	10	30
$M_n \cdot 10^{-3}$, г/моль	3,1	3,1	2,9	2,8	3,4	3,2
$M_w \cdot 10^{-3}$, г/моль	6,7	5,3	4,4	5,2	6,2	4,8
$M_z \cdot 10^{-3}$, г/моль	15,0	9,1	6,4	10,3	11,0	7,6
D	2,2	1,7	1,5	1,9	1,8	1,5

Примечание: Соотношение компонентов в обеих смесях – 4:1.

Среднемассовые молекулярные массы соответствуют молекулярным массам лигнинов ГЛ, которые также сравнимы с молекулярными массами щелочных и сульфатных лигнинов и низкомолекулярных лигносульфонатов [29]. При этом среднечисловые молекулярные массы оказались в 1,5 раза больше, чем для продуктов окисления ГЛ пероксидом водорода в кислой среде [5]. Как видно из рис. 7, кривые ММР в обоих случаях являются полимодальными и характеризуются наличием до 3 основных фракций с молекулярными массами,

условно ограниченными соответственно до 10^3 , $10^3 \dots 10^4$ и более 10^4 г/моль. Кроме того, на кривых ММР есть плечо, указывающее на наличие фракции с молекулярной массой близкой к $2 \cdot 10^3$ г/моль. В случае использования смеси ДМСО– HNO_3 в соотношении 4:1 нитрование ГЛ сопровождалось уменьшением фракции с молекулярными массами более 10^4 г/моль при увеличении продолжительности нагревания, что также подтверждает деполимеризацию лигнина ГЛ под действием азотной кислоты. Через 2 мин нагревания реакционной смеси достигалась полная делигнификация ГЛ и максимальная оптическая плотность при 280 нм, высокомолекулярная фракция продуктов нитрования ГЛ содержала макромолекулы с молекулярными массами до $6 \cdot 10^4$ г/моль, а максимум на кривой ММР этой фракции соответствовал примерно $22 \cdot 10^3$ г/моль. Увеличение продолжительности нагревания реакционной смеси приводило к уменьшению доли высокомолекулярной фракции, продукты деполимеризации которой пополнили основную фракцию с молекулярными массами в условном диапазоне $10^3 \dots 10^4$ г/моль и максимумом на кривой ММР около $4,2 \cdot 10^3$ г/моль. При нагревании реакционной смеси, вероятно, все фракции продуктов нитрования ГЛ подвергались деполимеризации, т. к. даже для фракции до 10^3 г/моль видна тенденция к уменьшению интенсивности.

При использовании смеси H_2O – HNO_3 4:1 для нитрования ГЛ кривые ММР образующихся продуктов имеют некоторые отличия от варианта со смесью ДМСО– HNO_3 . Например, через 2 мин нагревания реакционной смеси количество высокомолекулярной фракции оказалось несколько меньше, чем при нагревании в течение 10 мин. Это может указывать на замедление или нестабильность выхода высокомолекулярной фракции продуктов нитрования из ГЛ в отсутствие ДМСО. При этом обе фракции с меньшими молекулярными массами на кривой ММР характеризуются более высокими интенсивностями, чем в случае применения смеси ДМСО– HNO_3 . Это, вероятно, подтверждает более быстрый переход в щелочной раствор элементов с меньшими молекулярными массами при использовании смеси H_2O – HNO_3 , т. е. в первую очередь осуществляется делигнификация поверхностных слоев лигнина с их более сильной деполимеризацией. Через 30 мин нагревания кривые ММР продуктов нитрования ГЛ для обеих смесей были практически одинаковыми, для них также совпали индексы полидисперсности (табл. 2). Более высокие молекулярные массы продуктов, полученных при использовании смеси H_2O – HNO_3 , возможно, объясняются более сильным окислением продуктов нитрования ГЛ такой смесью, что должно приводить и к более сильному электростатическому отталкиванию ионизованных дополнительных карбоксильных групп. В результате конформации такие макромолекулы могут занимать больший объем и определяться эксклюзионной хроматографией как более высокомолекулярные. С другой стороны, при более глубоком окислении лигнина его макромолекулы, действительно, должны иметь молекулярные массы выше за счет введенных атомов кислорода.

Молекулярно-массовые характеристики также были определены для продуктов нитрования ГЛ при 100°C в течение 10 мин смесями ДМСО– HNO_3 и H_2O – HNO_3 составов 1:4 и 1:1. Кривые их ММР оказались практически одинаковыми вне зависимости от использованной смеси и соотношения ее составляющих и, в отличие от представленных на рис. 7, не содержали высокомолекулярной фракции, а более низкомолекулярные фракции оказались смещены в

сторону меньших значений молекулярных масс. Среднечисловые и среднемассовые молекулярные массы таких продуктов равнялись соответственно около $2 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^3$ г/моль. Это может говорить о некоей устойчивости образующихся продуктов к более глубокому окислению, например, для продуктов окисления ГЛ пероксидом водорода в кислой среде среднечисловая молекулярная масса также составила $2 \cdot 10^3$ [5]. В работе [5] отмечено, что растворимые продукты окисления ГЛ могут использоваться в тех же областях, что и лигносульфонаты. Такое же предположение следует высказать и о растворимых продуктах нитрования ГЛ с обеспечением необходимой глубины модификации и придания им требуемых свойств.

Заключение

Установлено, что обработка лигнина Класона ели смесями ДМСО– HNO_3 при соотношении компонентов от 1:4 до 6:1 в течение 10 мин приводит к его окислительной деградации, продукты которой растворимы в щелочной среде. При этом часть продуктов оказывается кислоторастворимой, а другая часть – кислотонерастворимой, доля последней увеличивается до 80 % и более при уменьшении количества азотной кислоты в реакционной смеси. Во всех случаях происходит нитрование и окисление лигнина, что подтверждается наличием соответствующих полос поглощения на ИК-спектрах продуктов. По данным ИК-спектроскопии установлено, что для смесей диметилсульфоксид– HNO_3 с меньшим содержанием азотной кислоты (соотношение компонентов 4:1) вводится меньше нитрогрупп, а повышение количества азотной кислоты обуславливает большее растворение лигнина, при этом кислотонерастворимые части имеют схожее строение (для соотношений компонентов смесей от 3:2 до 1:4). Делигнификация гидролизного лигнина смесями диметилсульфоксид– HNO_3 и H_2O – HNO_3 при соотношении компонентов 4:1 и температуре 60...100 °С описывается уравнениями 1-го порядка по лигнину. Кинетические зависимости характеризуются наличием индукционных периодов, продолжительность которых увеличивается с уменьшением температуры обработки, особенно для смеси диметилсульфоксид– HNO_3 . Наблюдаемые константы скоростей делигнификации оказались близкими при 100 °С для обеих смесей. Энергии активации при использовании смесей диметилсульфоксид– HNO_3 и H_2O – HNO_3 составили соответственно 96 и 86 кДж/моль. Демполимеризующее действие смесей диметилсульфоксид– HNO_3 и H_2O – HNO_3 подтверждено данными молекулярно-массового распределения продуктов нитрования гидролизного лигнина. Такие кривые для продуктов нитрования гидролизного лигнина смесями диметилсульфоксид– HNO_3 и H_2O – HNO_3 4:1 имеют полимодальный характер с 3 основными фракциями: наибольшая с молекулярной массой в условном диапазоне $10^3 \dots 10^4$ г/моль и 2 небольшие с молекулярными массами до 10^3 и более 10^4 г/моль. При этом последняя в ходе нагревания демполимеризуется азотной кислотой, пополняя основную фракцию $10^3 \dots 10^4$ г/моль. Среднечисловые молекулярные массы продуктов при различной продолжительности нитрования гидролизного лигнина смесями диметилсульфоксид– HNO_3 и H_2O – HNO_3 при соотношении веществ 4:1 находятся на уровне $3 \cdot 10^3$ г/моль, а индекс полидисперсности в процессе нитрования уменьшается соответственно с 2,2 и 1,9 до 1,5 для обеих смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беловежец Л.А., Волчатова И.В., Медведева С.А. Перспективные способы переработки вторичного лигноцеллюлозного сырья // Хим. раст. сырья. 2010. № 2. С. 5–16.
Belovezhets L.A., Volchatova I.V., Medvedeva S.A. Promising Methods for Processing Secondary Lignocellulosic Raw Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2010, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.).
2. Белькова Л.П., Громов В.С., Михайлов А.И. Полихронная кинетика процессов делигнификации древесины. 1. Процесс азотнокислотной делигнификации // Хим. древ. 1980. № 6. С. 50–58.
Bel'kova L.P., Gromov V.S., Mikhailov A.I. Polychronic Kinetics of Wood Delignification Process. 1. Nitric Acid Delignification Process. *Khimiya drevesiny*, 1980, no. 6, pp. 50–58. (In Russ.).
3. Белькова Л.П., Громов В.С., Михайлов А.И. Полихронная кинетика процессов делигнификации древесины. 2. Диффузионная кинетика азотнокислотной делигнификации // Хим. древ. 1980. № 6. С. 59–64.
Bel'kova L.P., Gromov V.S., Mikhailov A.I. Polychronic Kinetics of Wood Delignification Process. 2. Diffusion Kinetics of Nitric Acid Delignification. *Khimiya drevesiny*, 1980, no. 6, pp. 59–64. (In Russ.).
4. Горбунова О.Ф., Боголицына Г.М., Кочергина Г.Г. О делигнификации с азотной кислотой // Изв. вузов. Лесн. журн. 1991. № 3. С. 89–95.
Gorbunova O.F., Bogolitsyna G.M., Kochergina G.G. On Delignification with Nitric Acid. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1991, no. 3, pp. 89–95. (In Russ.).
5. Евстигнеев Э.И., Юзихин О.С., Гуринов А.А., Иванов А.Ю., Артамонова Т.О., Ходорковский М.А., Бессонова Е.А., Васильев А.В. Химическое строение и физико-химические свойства окисленного гидролизного лигнина // Журн. приклад. химии. 2015. Т. 88, № 8. С. 175–183.
Evstigneyev E.I., Yuzikhin O.S., Gurinov A.A., Ivanov A.Yu., Artamonova T.O., Khodorkovskii M.A., Bessonova E.A., Vasil'ev A.V. Chemical Structure and Physicochemical Properties of Oxidized Hydrolysis Lignin. *Zhurnal prikladnoj khimii* = Russian Journal of Applied Chemistry, 2015, vol. 88, pp. 1295–1303. <https://doi.org/10.1134/S107042721508011X>
6. Иванов В.И., Чуксанова А.А., Сергеева Л.Л. Нитрование гидролизного лигнина // Изв. АН СССР. Сер.: Хим. 1957. Т. 6, № 4. С. 503–508.
Ivanov V.I., Chuksanova A.A., Sergeeva L.L. Nitration of Saccharification Lignin. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya: Khimicheskaya* = Russian Chemical Bulletin, 1957, vol. 6, pp. 513–518. <https://doi.org/10.1007/BF01171974>
7. Капустина И.Б., Москальчук Л.Н., Матюшонок Т.Г., Позылова Н.М., Хололович М.Е. Исследование гидролизного лигнина в целях возможного использования в качестве мелиорант-сорбента для реабилитации загрязненных радионуклидами почв // Химия в интересах устойчивого развития. 2006. № 1. С. 17–22.
Kapustina I.B., Moskalchuk L.N., Matyushonok T.G., Pozylova N.M., Khololovich M.E. Investigation of Hydrolysis Lignin for the Purpose of its Possible Use as a Land Reclamation Sorbent for Rehabilitation of Soils Polutted with Radionuclides. *Khimiya v interesakh ustojchivogo razvitiya* = Chemistry for Sustainable Development, 2006, vol. 14, no. 1, pp. 13–18.
8. Романенко К.А., Богданович Н.И., Канарский А.В. Получение активных углей пиролизом гидролизного лигнина // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 162–171.
Romanenko K.A., Bogdanovich N.I., Kanarskiy A.V. Obtaining of Activated Carbons by Pyrolysis of Hidrolytic Lignin. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 4, pp. 162–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.162>

9. Сорокин В.И., Бакина Г.Г. Особенности делигнификации древесины различных пород при взаимодействии с растворами азотной кислоты // Хим. древ. 1980. № 5. С. 53–59.

Sorokin V.I., Bakina G.G. Features of Delignification of Wood of Different Species during Interaction with Nitric Acid Solutions. *Khimiya drevesiny*, 1980, no. 5, pp. 53–59. (In Russ.).

10. Хабаров Ю.Г., Лахманов Д.Е. Деполимеризация конденсированных лигнинов под действием азотной кислоты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 5. С. 173–181.

Habarov U.G., Lakhmanov D.E. Depolymerization of Condensed Lignins with Hydrogen Nitrate. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 5, pp. 173–181. (In Russ.).

11. Хабаров Ю.Г., Лахманов Д.Е., Косяков Д.С., Ульяновский Н.В. Изучение продуктов реакции гидролизного лигнина с азотной кислотой // Изв. АН. Сер.: Хим. 2016. Т. 65, № 1. С. 237–244.

Khabarov Yu.G., Lakhmanov D.E., Kosyakov D.S., Ul'yanovskii N.V. Studies of Reaction Products of Hydrolytic Lignin with Nitric Acid. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya: Khimicheskaya* = Russian Chemical Bulletin, 2016, vol. 65, pp. 237–244.

<https://doi.org/10.1007/s11172-016-1291-5>

12. Aditiya H.B., Mahlia T.M.I., Chong W.T., Nur H., Sebayang A.H. Second Generation Bioethanol Production: A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 66, pp. 631–653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.015>

13. Ahmad Z., Paleologou M., Xu C.C. Oxidative Depolymerization of Lignin Using Nitric Acid under Ambient Conditions. *Industrial Crops and Products*, 2021, vol. 170, art. no. 113757. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113757>

14. Bergna D., Varila T., Romar H., Lassi U. Activated Carbon from Hydrolysis Lignin: Effect of Activation Method on Carbon Properties. *Biomass and Bioenergy*, 2022, vol. 159, art. no. 106387. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106387>

15. Danielewicz D. Nitric Acid-Alkali Two-Stage Pulping of Wheat Straw, Industrial Hemp, and *Miscanthus x giganteus*. *BioResources*, 2023, vol. 18, iss. 4, pp. 7629–7644. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.7629-7644>

16. Hemmilä V., Hosseinpourpia R., Adamopoulos S., Eceiza A. Characterization of Wood-Based Industrial Biorefinery Lignosulfonates and Supercritical Water Hydrolysis Lignin. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, vol. 11, pp. 5835–5845.

<https://doi.org/10.1007/s12649-019-00878-5>

17. Khan N., Sudhakar K., Mamat R. Role of Biofuels in Energy Transition, Green Economy and Carbon Neutrality. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 22, art. no. 12374.

<https://doi.org/10.3390/su132212374>

18. Khvan A.M., Abduazimov B.B., Abduazimov Kh.A. Nitration of Lignin and Sorptive Properties of the Resulting Products. *Chemistry of Natural Compounds*, 2002, vol. 38, pp. 471–472. <https://doi.org/10.1023/A:1022128130251>

19. Kozhevnikov A.Yu., Semushina M.P., Podrukhina E.A., Kosyakov D.S. Modification of Hydrolysis Lignin by Hydrogen Peroxide to Obtain an Effective Adsorbent of Highly Toxic Rocket Fuel. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 155–161. <https://doi.org/10.18321/ectj646>

20. Lo C.-C., Chang Y.-W., Chen Y.-L., Liu Y.-L., Wu H.-S., Sun Y.-M. Lignin Recovery from Rice Straw Biorefinery Solid Waste by Soda Process with Ethylene Glycol as Co-Solvent. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, vol. 126, pp. 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.07.030>

21. Menezes F.F., Nascimento V.M., Gomes G.R., Rocha G.J.M., Strauss M., Junqueira T.L., Driemeier C. Depolymerization of Enzymatic Hydrolysis Lignin: Review of Technologies and Opportunities for Research. *Fuel*, 2023, vol. 342, art. no. 127796.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127796>

22. Pan C., Ji Y., Ren S., Lei T., Dong L. Lignin-Derived Activated Carbon as Electrode Material for High-Performance Supercapacitor. *Molecules*, 2025, vol. 30, no. 1, art. no. 89. <https://doi.org/10.3390/molecules30010089>

23. Popescu C., Dissanayake H., Mansi E., Stancu A. Eco Breakthroughs: Sustainable Materials Transforming the Future of Our Planet. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 23, art. no. 10790. <https://doi.org/10.3390/su162310790>

24. Rabinovich M.L. Lignin By-Products of Soviet Hydrolysis Industry: Resources, Characteristics, and Utilization as a Fuel. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2014, vol. 48, no. 7–8, pp. 613–631.

25. Ruwoldt J., Tanase-Opedal M., Syverud K. Ultraviolet Spectrophotometry of Lignin Revisited: Exploring Solvents with Low Harmfulness, Lignin Purity, Hansen Solubility Parameter, and Determination of Phenolic Hydroxyl Groups. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, iss. 50, pp. 46371–46383. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04982>

26. Sethupathy S., Morales G.M., Gao L., Wang H., Yang B., Jiang J., Sun J., Zhu D. Lignin Valorization: Status, Challenges and Opportunities. *Bioresource Technology*, 2022, vol. 347, art. no. 126696. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126696>

27. Smith B.C. Organic Nitrogen Compounds X: Nitro Groups, an Explosive Proposition. *Spectroscopy*, 2020, vol. 35, no. 9, pp. 27–31.

28. Smith B.C. The C=O Bond, Part III: Carboxylic Acids. *Spectroscopy*, 2018, vol. 33, iss. 1, pp. 14–20.

29. Vishtal A., Kraslawski A. Challenges in Industrial Applications of Technical Lignins. *BioResources*, 2011, vol. 6, iss. 3, pp. 3547–3568. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.6.3.vishtal>

30. Walker G.M. 125th Anniversary Review: Fuel Alcohol: Current Production and Future Challenges. *Journal of the Institute of Brewing*, 2011, vol. 117, iss. 1, pp. 3–22. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2011.tb00438.x>

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

