

DOI:10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Основан в 1833 г.

6

2025

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

6

2025

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ – СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

6

2025

EDITORIAL BOARD:

MELEKHOV V.I. – Editor-in-Chief, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)

BABICH N.A. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)

BOGOLITSYN K.G. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Chemistry, Prof.

(Russia, Arkhangelsk)

ANGELSTAM P. – Deputy Editor-in-Chief of the European Department, PhD, Prof.

(Sweden, Skinnskatteberg)

KOMAROVA A.M. – Executive Secretary, Candidate of Agriculture (Russia, Arkhangelsk)

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)

Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)

Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)

Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)

Gavrilova O.I., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Petrozavodsk)

Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)

Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)

Kazakov Ya.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)

Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)

Konovalov V.F., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Ufa)

Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)

Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)

Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)

Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)

Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)

Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)

Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)

Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)

Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)

Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)

Posypanov S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)

Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)

Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)

Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)

Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)

Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)

Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)

Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)

Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)

Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)

Tsarev A.P., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Voronezh)

Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)

Shchekalev R.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Saint Petersburg)

Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Е.В. Дмитриев, З.В. Говедар, П.Г. Мельник, Т.В. Кондранин.</i> Спутниковый мониторинг состояния насаждений ели сербской (<i>Picea omorika</i> (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская).....	9
<i>E.S. Chaychavadze, R.V. Schekalev, A.A. Grabovskiy, V.O. Romanova.</i> A Strategy for Adapting the Hydraulic System of Woody Plants to Various Tiers of the Floodplain Forest of the Enmyvaam River (Chukotka)	33
<i>В.М. Лебедев, Е.В. Лебедев.</i> Сравнительные эколого-физиологические характеристики реакции семенных древостоев дуба (<i>Quercus robur</i> L.) на лесорастительные условия.....	48
<i>А.С. Ильинцев, Е.Н. Наквасина, А.Г. Волков, А.П. Богданов, Н.А. Буньков.</i> Влияние почвенных свойств в дискретных микроповышениях на рост семян ели обыкновенной <i>Picea abies</i> (L.) Karst	60
<i>В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая.</i> Особенности реакции старовозрастной сосны при осушении водораздельной территории в Республике Коми	77
<i>Н.П. Чернобровкина, Е.В. Робонен, А.В. Егорова, К.Г. Нелаева, Е.А. Колосова.</i> Морозоустойчивость контейнерных семян сосны обыкновенной в условиях высоких широт	92
<i>Х.М. Хетагуров, И.А. Николаев, А.В. Грязькин, И.К. Сатцаева, Чан Чунг Тхань.</i> Сокопродуктивность высокогорных кленов Северного Кавказа	106

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

<i>Ren.Kh. Gainullin, R.R. Safin, A.V. Safina, Rish.Kh. Gainullin, E.M. Tsvetkova.</i> The Results of Experimental Studies of the Apparent Density of Wood..	119
<i>В.В. Огурцов, Е.В. Каргина, А.А. Орлов, Д.В. Дук.</i> Синхронизация технологий раскря бревен и сушки пиломатериалов.....	131

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ
И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

<i>И.С. Содиков, Н.В. Щербак.</i> Сравнительный анализ тароупаковочного картона, полученного из различных видов целлюлозного волокнистого сырья	142
---	-----

Ю.Г. Хабаров, Е.А. Скрипников, В.А. Вешняков, В.А. Плахин. Применение катионитов при модификации сульфатного лигнина азотистой кислотой	155
Л.Р. Галеева, А.А. Хадеева, С.Н. Якупов, Е.И. Байгильдеева. Барьерные и прочностные свойства мешочной бумаги с покрытием из агар-агара.....	169

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

О.Н. Тюкавина, С.А. Васькин, Д.Ю. Корепин, П.А. Феклистов, В.И. Мелехов, С.С. Макаров. Теплотворная способность деструктированной стволовой древесины ели <i>Picea abies</i> (L.)	179
А.А. Дрочкова, Н.Р. Сунгурова, Д.Н. Клевцов. Стимулирование всхожести и энергии прорастания семян сосны обыкновенной биохимическими препаратами	189
Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2025 г.	201





CONTENTS

FORESTRY

<i>E.V. Dmitriev, Z.V. Govedar, P.G. Melnik, T.V. Kondranin.</i> Satellite Monitoring of the State of Serbian Spruce (<i>Picea omorika</i> (Panč.) Purk.) Stands in the Mount Veliki Stolac Area (Republic of Srpska)	9
<i>E.S. Chavchavadze, R.V. Shchekalev, A.A. Grabovskiy, V.O. Romanova.</i> A Strategy for Adapting the Hydraulic System of Woody Plants to Various Tiers of the Floodplain Forest of the Enmyvaam River (Chukotka)	33
<i>V.M. Lebedev, E.V. Lebedev.</i> Comparative Ecological and Physiological Characteristics of the Response of Oak (<i>Quercus robur</i> L.) Seed Stands to Forest Growth Conditions	48
<i>A.S. Ilintsev, E.N. Nakvasina, A.G. Volkov, A.P. Bogdanov, N.A. Bun'kov.</i> The Influence of Soil Properties in Discrete Mounds on the Growth of Norway Spruce (<i>Picea abies</i> L. Karst.) Seedlings	60
<i>V.V. Pakhuchij, L.M. Pakhuchaya.</i> Peculiarities of the Response of Old-Growth Pine to Drainage of a Watershed Area in the Komi Republic	77
<i>N.P. Chernobrovkina, E.V. Robonen, A.V. Egorova, K.G. Nelaeva, E.A. Kopusova.</i> Frost Resistance of Containerized Scots Pine Seedlings in High Latitudes	92
<i>Kh.M. Khetagurov, I.A. Nikolaev, A.V. Gryazkin, I.K. Sattsaeva, C.C. Thanh.</i> Sap Productivity of the High-Mountain Maple Stands in the North Caucasus.....	106

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

<i>Ren.Kh. Gainullin, R.R. Safin, A.V. Safina, Rish.Kh. Gainullin, E.M. Tsvetkova.</i> The Results of Experimental Studies of the Apparent Density of Wood ..	119
<i>V.V. Ogurtsov, E.V. Kargina, A.A. Orlov, D.V. Duk.</i> Synchronization of Log Cutting and Sawn Timber Drying Technologies.....	131

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

<i>I.S. Sodikov, N.V. Shcherbak.</i> Comparative Analysis of Packaging Cardboard Obtained from Different Types of Cellulose Fibrous Raw Materials.....	142
--	-----

<i>Yu.G. Khabarov, E.A. Skripnikov, V.A. Veshnyakov, V.A. Plakhin.</i> The Use of Cationites in the Modification of Kraft Lignin with Nitrous Acid	155
<i>L.R. Galeeva, A.A. Khadeeva, S.N. Yakupov, E.I. Baygildeeva.</i> Barrier and Strength Properties of Agar-Agar Coated Sack Paper	169

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

<i>O.N. Tyukavina, S.A. Vaskin, D.Yu. Korepin, P.A. Feklistov, V.I. Melekhov, S.S. Makarov.</i> Calorific Value of the Degraded Stem Wood of Spruce <i>Picea abies</i> (L.)	179
<i>A.A. Drochkova, N.R. Sungurova, D.N. Klevtsov.</i> Stimulation of Germination and Germination Energy of Scots Pine Seeds with Biochemical Preparations.....	189
Index of Articles Published in the Russian Forestry Journal in 2025	201



Научная статья

УДК 528.88:630*181

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-9-32

Спутниковый мониторинг состояния насаждений ели сербской (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская)

Е.В. Дмитриев^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [E-4794-2014](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5363-3934>

З.В. Говедар^{3,4}, чл.-кор. АНИРС, д-р с.-х. наук, проф.;

ResearcherID: [AAN-6314-2019](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

П.Г. Мельник⁵, канд. с.-х. наук, доц.;

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

Т.В. Кондранин¹, д-р физ.-мат. наук, проф.;

ResearcherID: [K-9407-2013](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3565-3194>

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия, 141701; yegor@mail.ru, kondr@kondr.rector.mipt.ru

²Институт вычислительной математики РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, Россия, 119333; yegor@mail.ru

³Университет Баня-Луки, факультет лесного хозяйства, бульв. Петра Бойовича, д. 1а, г. Баня-Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина, 78000; zoran.govedar@sf.unibl.org

⁴Академия наук и искусств Республики Сербской, бульв. Бана Лазаревича, д. 1, г. Баня-Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина, 78000; zoran.govedar@sf.unibl.org

⁵Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; melnik_petr@bk.ru

Поступила в редакцию 26.06.24 / Одобрена после рецензирования 10.09.24 / Принята к печати 13.09.24

Аннотация. Мультиспектральные спутниковые изображения среднего пространственного разрешения являются основным источником информации для осуществления дистанционного мониторинга древостоев, включая оценку лесотаксационных и биопродукционных параметров древостоев, а также изменений жизненного состояния видов. Цель данной работы – определение последствий пирогенного воздействия на одну из наиболее крупных популяций сербской ели (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская, 1675 м над ур. м.) с использованием многовременных многоспектральных изображений Sentinel-2. Сербская ель – это реликтовый, исчезающий древесный вид, общая популяция которого значительно сокращается за последние 100 лет. В настоящее время естественное местообитание данного вида ограничивается небольшой территорией на границе Сербии и Боснии и Герцеговины. Для анализа спутниковой информации мы предложили многоэтапный метод, позволяющий выделить популяцию сербской ели на обследуемых землях, определить динамику из-



менения жизненного состояния за последние 10 лет и оценить последствия от лесного пожара, произошедшего в данном районе в 2021 г. Выявлено, что повреждения получило около 50 % площади насаждений сербской ели, причем для 1/2 этих площадей прогнозируется гибель вида. Наибольший ущерб нанесен насаждениям в центральной части северного склона горы Великий Столац. Средние оценки площадей классов повреждений за восстановительный период: здоровые – 17,6 га, ослабленные – 8,4 га, поврежденные – 8,0 га, усыхающие – 1,2 га. Анализ вегетационных индексов показал отсутствие значимых тенденций к естественному возобновлению сербской ели. Изучение изображений за 2024 г. позволяет обоснованно предположить, что начался процесс замещения сербской ели лиственными видами, при этом улучшения жизненного состояния популяции сербской ели не ожидается. Таким образом, для сохранения данной популяции необходимо проведение работ по лесовосстановлению этой ценной реликтовой породы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, спутниковые изображения, лесные пожары, ель сербская, *Picea omorika* (Panč.) Purk.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-00128 «Методы машинного обучения в задаче автоматизации обработки данных космических систем высокодетального мониторинга растительного покрова».

Для цитирования: Дмитриев Е.В., Говедар З.В., Мельник П.Г., Кондранин Т.В. Спутниковый мониторинг состояния насаждений ели сербской (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 9–32. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-9-32>

Original article

Satellite Monitoring of the State of Serbian Spruce (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) Stands in the Mount Veliki Stolac Area (Republic of Srpska)

Egor V. Dmitriev^{1,2}, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Senior Research Scientist; ResearcherID: [E-4794-2014](https://orcid.org/0000-0001-5363-3934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5363-3934>

Zoran V. Govedar^{3,4}, Corresponding Member of the Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAH-6314-2019](https://orcid.org/0000-0001-9791-4113), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

Petr G. Melnik⁵, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

Timofey V. Kondranin¹, Doctor of Physics and Mathematics, Prof.; ResearcherID: [K-9407-2013](https://orcid.org/0000-0003-3565-3194), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3565-3194>

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), per. Institutskiy, 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation; yegor@mail.ru, kondr@kondr.rector.mipt.ru

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 8, Moscow, 119333, Russian Federation; yegor@mail.ru

³University of Banja Luka, Faculty of Forestry, blv. Petar Bojovic, 1a, Banja Luka, Republic of Srpska, 78000, Bosnia and Herzegovina; zoran.govedar@sf.unibl.org

⁴Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, blv. Ban Lazarevic, 1, Banja Luka, Republic of Srpska, 78000, Bosnia and Herzegovina; zoran.govedar@sf.unibl.org



⁵Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch) (National Research University), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; melnik_petr@bk.ru✉

Received on June 26, 2024 / Approved after reviewing on September 10, 2024 / Accepted on September 13, 2024

Abstract. Multispectral satellite images of medium spatial resolution are the main source of data for remote sensing of stands, including the assessment of forest inventory and biological productivity parameters of stands, as well as changes in the vital status of species. The aim of this work has been to determine the effects of pyrogenic impact on one of the largest populations of Serbian spruce (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) in the Mount Veliki Stolac area (the Republic of Srpska, 1,675 m above sea level) using multi-temporal multispectral Sentinel-2 imagery. Serbian spruce is a relict, endangered tree species whose total population has been declining significantly over the past 100 years. Currently, the natural habitat of this species is limited to a small area on the border of Serbia and Bosnia and Herzegovina. To analyze satellite data, a multi-stage method has been proposed that has allowed identifying the Serbian spruce population in the surveyed areas, determining the dynamics of changes in vital status over the past 10 years, and assessing the effects of the forest fire that occurred in this area in 2021. It has been revealed that approximately 50 % of Serbian spruce stands have been damaged, with the species predicted to die for 1/2 of these areas. The greatest damage has been caused to the stands in the central part of the northern slope of Mount Veliki Stolac. Average estimates of the areas of vital status for the recovery period are: healthy – 17.6 ha, weakened – 8.4 ha, damaged – 8.0 ha, drying out – 1.2 ha. The analysis of vegetation indices has shown the absence of significant trends towards natural regeneration of Serbian spruce. The examination of images for 2024 allows us to reasonably assume that the process of replacing Serbian spruce with deciduous species has begun, while no improvement in the vital status of the Serbian spruce population is expected. Thus, in order to preserve this population, it is necessary to carry out reforestation of this valuable relict species.

Keywords: remote sensing, pattern recognition, satellite imagery, forest fires, Serbian spruce, *Picea omorika* (Panč.) Purk.

Acknowledgements: The research was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of research project no. 23-29-00128 “Machine Learning Methods for Automation of Processing Data from Satellite Systems of Highly Detailed Monitoring of Vegetation Cover”.

For citation: Dmitriev E.V., Govedar Z.V., Melnik P.G., Kondranin T.V. Satellite Monitoring of the State of Serbian Spruce (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) Stands in the Mount Veliki Stolac Area (Republic of Srpska). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 9–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-9-32>

Введение

Аэрокосмический мониторинг редких и исчезающих видов деревьев является важнейшей частью реализации государственных программ, направленных на сохранение биоразнообразия лесов [53]. С использованием спутниковой оптической аппаратуры среднего и высокого пространственного разрешения удастся получить оценки временной изменчивости характеристик конкретных популяций, классифицировать жизненное состояние и категорию сохранности рассматриваемого вида [4, 9, 40, 45]. Данные мониторинга также позволяют судить об эффективности управленческих решений и корректировать меропр-

ятия по лесной охране. Анализируя результаты исследований последних лет, можно отметить существенное продвижение работ по созданию полной базы данных инвентаризации растений, расположенных на территории Китайской народной республики, включая оцифровку гербарных образцов и создание банка ДНК [56]. Исследования, посвященные оценке влияния изменений глобального климата на лесные экосистемы, показывают тенденцию к сокращению ареалов произрастания редких видов деревьев, распространенных в горных районах Китая и их постепенное смещение на север [55].

Сохранение биоразнообразия на территории России в первую очередь связано с созданием особо охраняемых природных территорий. Контроль состояния растительного покрова производится на основе данных наземных обследований и аэрокосмической информации. Своевременное обнаружение быстрого снижения численности и сужения ареалов произрастания редких и исчезающих видов деревьев, происходящих вследствие изменения климата, антропогенных выбросов и лесных пожаров, способствует разработке адекватных мер по сохранению и восстановлению лесных популяций [6].

Одним из наиболее важных направлений осуществления контроля является мониторинг лесных пожаров. В результате мониторинга производится обнаружение очагов горения, оценка площади поврежденных насаждений и исследование процесса естественного возобновления лесов [44]. Помимо природных факторов угнетение редких видов растений связывается с рекреационным воздействием [6]. Для поддержания процессов естественного возобновления лесов после пирогенного воздействия большое значение имеет оценка их жизненного состояния. Традиционно определение жизненного состояния древостоев производится в ходе наземных обследований, проведение которых связано со значительными временными затратами [26]. Использование данных спутникового зондирования и соответствующих методов автоматизированной обработки позволяет своевременно актуализировать информацию о состоянии лесных территорий, что имеет особое значение для исчезающих и редких видов деревьев, являющихся важной компонентой лесных экосистем [1, 2].

Хвойные деревья представляют собой самую большую группу голосеменных растений, содержащую около 600 видов и составляющую более 25 % лесов мира [49], однако при этом, в соответствии со статистическими данными Международного союза охраны природы (МСОП), примерно 34 % видов хвойных деревьев находятся под угрозой исчезновения [29]. Причиной являются относительно низкие скорость роста и способность к расселению у хвойных деревьев, что снижает их возможность адаптироваться к быстрым изменениям окружающей среды [39, 50].

В данной работе приводятся результаты мониторинга насаждений сербской ели (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в Республике Сербской с использованием многоспектральных спутниковых изображений среднего пространственного разрешения за последние 10 лет. В настоящее время данный вид занесен в Красную книгу МСОП как находящийся под угрозой исчезновения [10]. Ареал сербской ели не является сплошным, он постепенно сокращается (*area perforata* – *area фрагментата* – *area solitaris*) в основном на недоступных, очень крутых склонах. Вид чувствителен к негативным воздействиям биотического и абиотического характера, в связи с чем в последнее время происходит постоянное сокращение его площади произрастания. Основными причинами деградации

данного вида являются изменение погодных условий, поражение вредителями и пирогенное воздействие [30]. Из-за растущей угрозы утраты этого вида были начаты многочисленные мероприятия с целью его сохранения путем содействия естественному возобновлению (*in situ*), т. е. сохранению генетического разнообразия на уровне популяции [33].

Общее увеличение пожарной опасности, наблюдаемое в последнее время в связи с глобальным потеплением климата [48], коснулось и труднодоступных местообитаний ели сербской. Крупные пожары зафиксированы в середине 1946 и 1947 гг., поскольку это были засушливые годы с бездождевым периодом, что привело к уничтожению крупных массивов вида в районе гор Явор и Сморчево Точило [22]. Этот древостой ранее частично погиб вследствие лесного пожара, произошедшего от несоблюдения правил охоты [35]. Пожары и раньше становились причиной сокращения площадей ели и смены ее насаждений насаждениями других видов, особенно в XIX в. [46]. Помимо поражения самих деревьев, лесные пожары приводят к изменению физико-химических и биологических свойств лесных почв. На основе фитоценологических наблюдений проведены непрерывные исследования динамики сукцессии в зоне лесного пожара (природный заповедник «Караула Штула», г. Вишеград) и установлено спонтанное естественное возобновление ели, которая только через 30 лет образует растительные сообщества [16, 17]. Вследствие выгорания гумусовых веществ снижается ферментативная активность и повышается уровень pH лесных почв, что, в свою очередь, влечет изменение видового состава древостоев [54]. Поскольку сербская ель имеет низкую энергию роста по сравнению с видами-конкурентами [42], такими как ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst.) и бук лесной (*Fagus sylvatica* L.), в местах гарей происходит постепенное замещение коренного вида и образование смешанных древостоев [11, 14]. Эти и другие изменения состояния насаждений ели сербской могут быть оценены на основе анализа многовременных многоспектральных изображений среднего пространственного разрешения.

Целью работы является определение последствий пирогенного воздействия на одну из наиболее крупных популяций сербской ели (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская) с использованием многовременных многоспектральных изображений Sentinel-2.

Объекты и методы исследования

Сербская ель, или ель Панчича (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) была обнаружена и классифицирована как отдельный вид во второй половине XIX в. в Сербии в районе дер. Заовине [36]. Это один из старейших видов европейских деревьев, происходящих из третичного периода [51]. Исследования ископаемых остатков *Picea omoricoides* показывают, что ранее насаждения вида были довольно распространены и занимали значительные площади в Европе [8, 52]. В дальнейшем произошло существенное сокращение как площади распространения, так и площади обитания данного вида, и в настоящее время ель сербская рассматривается как эндемичный вид Балканского полуострова.

Ареал произрастания сербской ели состоит из 5 участков, из которых 2 наиболее крупных расположены в районе среднего и верхнего течения р. Дрина, протекающей вдоль границы между Республикой Босния и Герцеговина и Республикой Сербия. По современным оценкам площадь распростра-

нения ели сербской составляет около 4000 км². Ареал состоит из 26 изолированных групп различного размера, которые могут содержать как менее 10, так и более 1000 особей. Общая площадь обитания не превышает 200 км². В работе [34] приведено описание 14 крупных естественных мест обитания сербской ели на территории Сербии и Боснии и Герцеговины.

Наиболее крупный участок расположен в районе горного массива Великий Столац, который был выбран в качестве территории исследования (рис. 1). Участок находится в восточной части Боснии и Герцеговины недалеко от р. Дрина на высоте около 1100–1500 м над ур. м. и относится к Столацкому реликтовому сектору Иллирийской провинции [19]. Оценки площади данного местообитания отличаются в различных источниках. По данным [34], площадь составляет 60,8 га, по данным портала EUFGIS ([http://portal.eufgis.org/search/simple/list/details/?tx_wfqbe_pi1\[unit_number\]=BIN00093](http://portal.eufgis.org/search/simple/list/details/?tx_wfqbe_pi1[unit_number]=BIN00093)) – 29,5 га, а по нашим предварительным оценкам – 40,8 га.

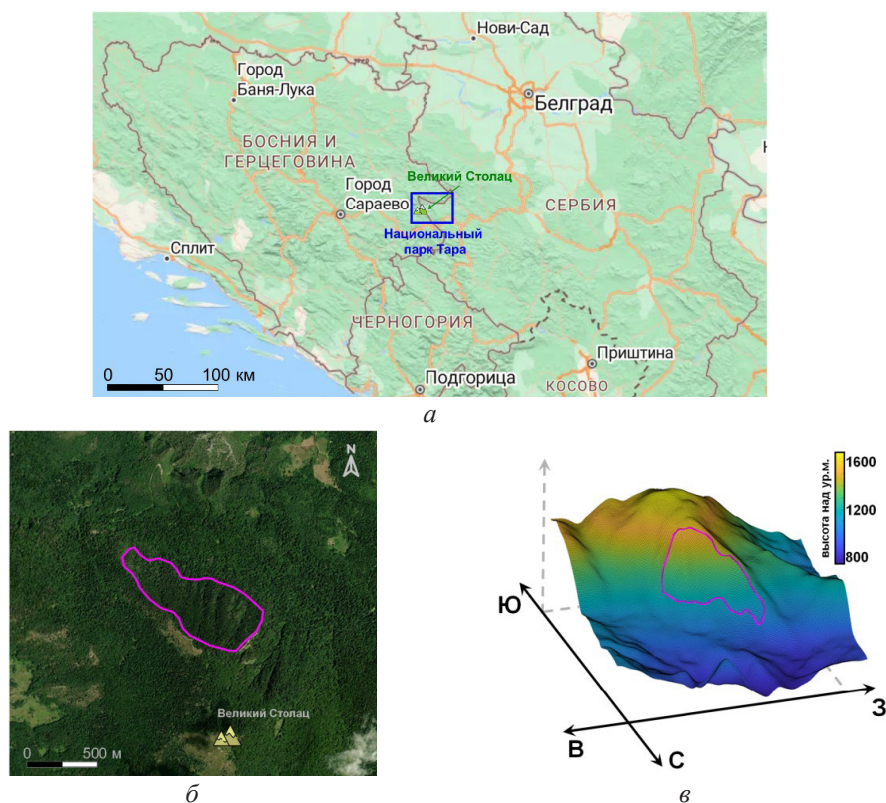


Рис. 1. Популяция ели сербской в районе горы Великий Столац: а – местоположение национального парка Тара (Сербия) и горы Великий Столац; б – RGB-изображение территории исследования; в – цифровая модель рельефа территории исследования (фиолетовым контуром выделен основной ареал обитания ели сербской в данном районе)

Fig. 1. The population of Serbian spruce in the Mount Veliki Stolac area: а – location of Tara National Park (Serbia) and Mount Veliki Stolac; б – RGB-image of the study area; в – digital elevation model of the study area (the purple outline highlights the main habitat of Serbian spruce in this area)

Для данной местности характерно большое количество осадков в весенние и летние месяцы. Среднегодовое количество осадков в период 1961–1990 гг. составляет 1009 мм, а среднее количество осадков за вегетационный период

(с апреля по сентябрь) – 562 мм. Среднегодовая температура воздуха за указанный период равняется 5,9 °С. Средняя температура воздуха за вегетационный период – 11,3 °С. Геологическая основа – известняки среднетриасовой формации, образующие гряды и скальные выступы. Почвенный слой имеет малую или среднюю глубину, без четкой структуры, с вкраплениями известняков. Содержание гумуса колеблется от 10,71 % на глубине 20 см, до 8,83 % на глубине 20–40 см. Реакция почвы кислая на глубине около 15 см.

Насаждения сербской ели расположены на северном склоне между скальными грядами. Ель сербская произрастает на данном участке в смеси с елью европейской. Представленность изучаемого вида в смешении довольно велика и колеблется в пределах 60–80 %, при этом образуются и чистые по составу насаждения. Незадолго до Второй мировой войны в районе горы Великий Столац была проведена инвентаризация насаждений сербской ели. Согласно полученным данным, в рассматриваемом районе насчитывалось около 38 000 взрослых деревьев, часть из которых имела довольно крупные размеры. По современным оценкам популяция сократилась до 10 000 деревьев [34].

Для определения конкретных локаций и состояния насаждений сербской ели на рассматриваемой территории использовались многовременные мультиспектральные изображения Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 и 20 м за период с 2015 по 2024 гг. Относительный номер орбиты для изображений района исследования – 36. Изображения соответствуют уровню обработки L2A – отражательная способность на нижней границе атмосферы. Брали только базовые линии обработки 500 (2015–2020 гг.), 400 (2022 г.), 509 (2023 г.), 510 (до 23 июля 2024 г.) и 511 (после 23 июля 2024 г.), что позволяет рассчитывать на лучшую гармонизацию спектральных характеристик. Для данных продуктов применяются усовершенствованные оценки топографической и атмосферной коррекции, улучшенные алгоритмы распознавания облаков и теней от облаков, выравнивания изображений S2A и S2, вводятся оценки радиометрического смещения каналов.

Для обработки были выбраны изображения, которые не содержат облачности в области размером 2,7×2,5 км, в центре которой находятся насаждения сербской ели. Рассматриваемый ареал произрастания расположен на достаточно крутом склоне, ориентированном на север и северо-восток. Таким образом, в период с октября по март поверхность данного склона будет находиться в орographic тени, что существенно искажает спектральные характеристики и делает обработку данных за этот промежуток времени практически невозможной.

На начальном этапе для фильтрации проблемных изображений использовалась информация из данных стандартной классификации сцены, которые входят в продукт Sentinel-2 уровня обработки L2A. Стандартная процедура классификации сцены включает в себя 4 целевых класса: растительность, вода, снег и прочие (нерастительные) объекты. Облачность высокой и средней плотности классифицируется достаточно точно, однако с остальными типами помех могут возникать ошибки. На рис. 2 представлены основные типы проблемных изображений, которые фильтровались на основе визуального контроля. Наиболее частой проблемой является появление мозаичной структуры вследствие влияния облачности низкой плотности в верхних слоях атмосферы (рис. 2, а). На рис. 2, б представлена сцена, где интересующая нас область полностью попадает в тень от горы, при этом после атмосферной и топографической коррек-

ции данные также получают сильно искаженными. На рис 2, в показана сцена с радужной полосой, которая может возникать вследствие влияния аэрозолей. Также могут появляться сцены, в которых стандартный алгоритм классификации не распознает или ошибочно классифицирует тени от облаков (рис. 2, з).

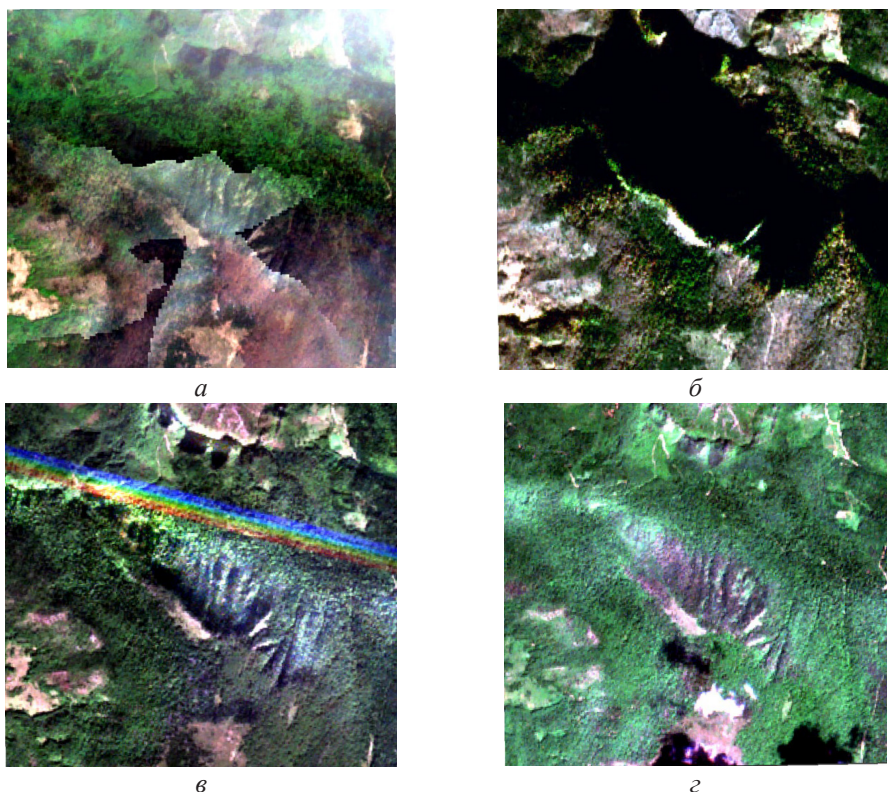


Рис. 2. Примеры проблемных изображений: *а* – влияние перистых облаков (09.05.2020); *б* – орографические тени (20.11.2021); *в* – влияние аэрозолей (27.09.2018); *з* – тени от облаков (27.09.2018)

Fig. 2. The examples of the corrupted images: *a* – influence of cirrus clouds (09.05.2020); *б* – orographic shadows (20.11.2021); *в* – influence of aerosols (27.09.2018); *з* – shadows from clouds (27.09.2018)

Спутниковый мониторинг территории подразумевает решение следующих задач: классификацию основных типов наземных объектов и сегментацию целевого вида деревьев; анализ временной динамики вегетационных индексов целевого вида и прочих объектов растительного покрова в период вегетации; оценку изменения жизненного состояния целевого вида. Схема, характеризующая основные этапы тематической обработки, представлена на рис. 3. Распознавание наземных объектов проводится на основе временных изменений вегетационных индексов с использованием различных алгоритмов обучаемой классификации. Для обучения выделяется период времени, отличающийся отсутствием существенных негативных воздействий природных и антропогенных факторов. В рассматриваемом случае целевым видом является сербская ель. К остальным классам объектов относятся прочие хвойные и лиственные виды деревьев, луговая растительность и открытые почвы. Естественные насаждения ели сербской в фитоценологии подразделяются на 7 экологических сообществ на разных геологических субстратах (известняки, серпентиниты, доломиты и слан-

цы), из которых только одно (на горе Великий Столац) можно отнести к чистым по составу насаждениям [23]. Коренное сообщество ели сербской – *Omorikae–Pineto–Piceeto–Abieto–Fagetum mixtum* [15] имеет многочисленные стадии сукцессии (*Omorikae–Piceeto–Abieto–Fageto–Pinetum-nigrae*, *Omorikae–Piceeto–Abieto–Fageto–Ostryeto–Pinetum nigrae*, *Omorikae–Piceeto–Abieto–Fagetum mixtum*, *Omorikae Piceeto–Abieto–Fageto–Pinetum nigrae*, *Omorikae Piceeto–Abieto–Fageto–Pinetum mixtum*, *Omorikae–Piceeto–Abieto–Fageto–Alnetum mixtum*). Хвойные породы представлены преимущественно елью европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) с небольшим участием пихты белой, или европейской (*Abies alba* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Из лиственных пород деревьев, образующих сообщества с елью сербской, главным образом представлены бук лесной (*Fagus sylvatica* L.), клен ложноплатановый (*Acer pseudoplatanus* L.), береза повислая (*Betula pendula* Roth.), осина (*Populus tremula* L.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) и другие виды деревьев. Специфичным является сообщество на торфяных почвах с ольхой черной (*Alnus glutinosae* (L.) Gaertn.).



Рис. 3. Основные этапы тематической обработки многовременных изображений Sentinel-2

Fig. 3. The main stages of thematic processing of Sentinel-2 multi-temporal images

В качестве спектральных признаков, используемых для классификации растительного покрова, применялись вегетационные индексы (ВИ), характеризующие фотосинтетическую активность. Для вычисления ВИ брали данные спектральных каналов Sentinel-2 с разрешением 10 и 20 м. Обозначения каналов имеют вид Bxx (B – band, xx – номер из 2 цифр) в соответствии с документацией продукта S2L (<https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/>). Основные пространственные и спектральные характеристики используемых каналов спутниковой аппаратуры Sentinel-2A (S2A) и Sentinel-2B (S2B) представлены в табл. 1. При вычислении ВИ-каналы с разрешением 20 м масштабировались к разрешению 10 м с помощью линейной интерполяции.

Таблица 1

Характеристики используемых каналов спутниковой системы Sentinel-2
The characteristics of the Sentinel-2 satellite system spectral bands used in the study

Канал	Пространственное разрешение, м	S2A		S2B	
		длина волны, нм	полуширина, нм	длина волны, нм	полуширина, нм
B03	10	559,8	36	559,0	36
B04	10	664,6	31	665,0	31
B05	20	704,1	15	703,8	16
B08	10	832,8	106	833,0	106
B11	20	1613,7	91	1610,4	94
B12	20	2202,4	175	2185,7	185

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) характеризует биомассу органов фотосинтетической деятельности растений [38]:

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}.$$

Относительный индекс ClGreen (Green Chlorophyll Index)

$$ClGreen = \frac{B08}{B03} - 1$$

является показателем концентрации хлорофиллов *a* и *b* в листьях растений [25]. Нормализованный разностный индекс красного края NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)

$$NDRE = \frac{B08 - B05}{B08 + B05}$$

также связан с концентрацией хлорофиллов и косвенным образом характеризует поглощение азота. Индекс NDRE – хороший индикатор изменения жизненного состояния растений [12].

Перечисленные индексы в различной степени чувствительны к изменениям состояния внутренней структуры тканей листа и концентрации пигментов. Отражение листьями солнечного излучения в видимом ближнем инфракрасном диапазоне происходит в первую очередь за счет полного внутреннего отражения тканями губчатого мезофилла, который благодаря развитой системе межклетников обладает большой внутренней поверхностью [32]. Подтверждением этого служат результаты измерения отражательной способности белой и зеленой частей листа пестролистной герани. Инфильтрация воды в межклеточное пространство приводит к резкому снижению отражательной способности, поскольку при заполнении воздушных полостей происходит уменьшение отражающей поверхности и соответствующие внутренние структуры начинают образовывать непрерывную среду.

В видимом диапазоне при многократном прохождении света через клетки паренхимы листовой пластины его интенсивно поглощают различные пигменты: хлорофиллы, каротиноиды и антоцианы. Максимум поглощения соответствует длинам волн менее 400–500 нм, однако канал B02 данного диапазона считается неинформативным, поскольку поглощение производится как

хлорофиллами, так и каротиноидами. Более высокая отражательная способность листьев в зеленой области спектра (канал B03) обусловлена снижением поглощения хлорофиллами и каротиноидами, однако при этом увеличивается поглощение антоцианами. В красной области спектра (канал B04) происходит интенсивное поглощение хлорофиллом, а в ближнем инфракрасном диапазоне (канал B08) лучи пропускают все перечисленные пигменты.

Проблема использования индекса NDVI при оценке содержания хлорофилла в листьях растений возникает в связи с тем, что насыщение поглощения наблюдается уже при относительно небольших концентрациях данного пигмента [41]. Одно из решений данной проблемы состоит в использовании канала красного края (B05). Излучение данного диапазона гораздо глубже проникает в ткани листа, что обеспечивает достаточную чувствительность индекса NDRE к изменениям концентрации хлорофилла также на средней и поздней стадиях развития листы [13].

При понижении концентрации хлорофилла яркость в канале B03 возрастает за счет ослабления поглощения, при этом яркость в канале B08 остается без ощутимых изменений. Таким образом, существует положительная обратная связь между значением ClGreen и концентрацией хлорофилла. Результаты экспериментов, представленные в [25], показывают, что данная зависимость может быть проиллюстрирована линейной функцией.

Важным фактором, влияющим на точность картирования основных типов объектов при помощи описанных вегетационных индексов, является выбор алгоритма классификации. Мы рассмотрели 3 нелинейных алгоритма обучаемой классификации, обладающих различной точностью и вычислительной эффективностью: метод самокорректирующихся кодов (ECOC), оптимизированный метод k ближайших соседей (KNN) и полносвязную нейронную сеть (FCNN). Метод самокорректирующихся кодов является ансамблевым алгоритмом классификации, который позволяет решать задачу многоклассовой классификации с использованием серии бинарных классификаций [18]. В качестве базового бинарного классификатора использовался метод опорных векторов с гауссовским ядром [47].

Метод k ближайших соседей является универсальным метрическим классификатором, который формирует достаточно сложные дискриминантные поверхности [27]. В классическом виде данный метод имеет низкую вычислительную эффективность, однако в нашей работе применяется быстрая модификация KNN с оптимизированным поиском на основе kd-деревьев [28]. Полносвязные глубокие нейронные сети прямого распространения являются «универсальными аппроксиматорами» и составляют основу для построения более гибких алгоритмов обучаемой классификации [7]. Используемый в этой работе классификатор FCNN имеет 2 скрытых слоя с функциями активации ReLU и Softmax. Проведенные нами тестовые эксперименты на искусственных данных, полученных с помощью статистического моделирования, показали, что для наиболее сложных случаев FCNN характеризуется наибольшей точностью среди рассмотренных методов.

Проблемой, свойственной процессу обработки многовременных мультиспектральных изображений, является избыточность информации. Для выбора используемых периодов съемки брали информацию о характерных датах наступления фенологических событий для данной территории на различных высотах. В целях оптимизации признаков применялся регуляризованный метод

последовательного отбора [20], который позволяет получить последовательность наиболее информативных признаков, устойчивую к малым возмущениям обучающего множества.

Анализ неопределенности классификации состоит в оценке стандартных характеристик точности используемых методов и выделении областей, для которых различные методы дают различные результаты. Стандартные характеристики ошибки классификации рассчитываются на основе матрицы ошибок (CV – confusion matrix) с применением переклассификации и кросс-валидации [21, 27]. Основной характеристикой является полная вероятность ошибки (TE – total error), которая представляет собой отношение ошибочно классифицированных пикселей к общему количеству пикселей. Также вычисляются средние значения ошибок оmissии (TOE – total omission error) и комиссии (TCE – total commission error), которые соответственно характеризуют вероятность ошибочной классификации фактических классов и ответов классификатора.

Для установления классов жизненного состояния дополнительно к описанным вегетационным индексам использовались нормализованный разностный индекс определения гарей (NBR – Normalized Burn Ratio) и нормализованный разностный индекс влажности (NDMI). Для изображений Sentinel-2 индекс NBR вычисляется по формуле

$$\text{NBR} = \frac{B08 - B12}{B08 + B12}$$

и применяется для определения зон, получивших наибольшие повреждения от пожара [31]. Области свежих гарей после верхового пожара имеют низкую отражательную способность в БИК-диапазоне и высокую отражательную способность в коротковолновом ИК-диапазоне, что полностью противоположно отражательной способности здоровой растительности. Для выявления выгоревших областей и оценки уровня ущерба от пожара обычно применяют спектрально-временной индекс

$$\Delta \text{NBR} = \text{PrefireNBR} - \text{PostfireNBR},$$

который показывает изменение NBR непосредственно до и после пожара. В частности, такой подход позволяет отличить гари от открытых участков черных почв, которые имеют схожие значения NBR.

Еще одной проблемой, возникающей вследствие пирогенного воздействия на лесные насаждения, в особенности на хвойные виды, является наличие дефицита воды в зеленых фитоэлементах. Для определения уровня водного стресса используется нормализованный разностный индекс влаги (NDMI – Normalized Difference Moisture Index). Изначально данный индекс был введен в работе [24] как нормализованная разность отражательной способности при длинах волн 860 и 1240 нм. Однако в дальнейших исследованиях, например в [43], канал коротковолнового ИК-диапазона был смещен в область 1600 нм, таким образом, для данных Sentinel-2 NDMI вычисляется по формуле

$$\text{NDMI} = \frac{B08 - B11}{B08 + B11}.$$

Для оценки жизненного состояния древостоев обычно используют дискретные характеристики (классы жизненного состояния), которые определяются по набору показателей поражения отдельных деревьев. Так, при установлении жизненного состояния лесов Московской области М.Е. Кобельков и др. [3]

ввели 6 категорий деревьев: здоровые (без признаков ослабления), ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, свежий и старый сухостой. В дальнейшем при исследовании поражения сибирских лесов уссурийским полиграфом С.А. Кривец и др. [5] предложили шкалу категорий состояния деревьев пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.).

Для наиболее точного описания жизненного состояния необходимо использовать изображения сверхвысокого пространственного разрешения (например, изображения с БПЛА), которые позволяют фиксировать изменения на уровне крон отдельных деревьев. В нашем случае элемент разрешения Sentinel-2 характеризует отражательную способность группы деревьев, следовательно, мы не можем определить изменения структуры крон отдельных деревьев и должны ориентироваться на референсные значения вегетационных индексов. Общая схема алгоритма определения классов жизненного состояния приведена на рис. 4.

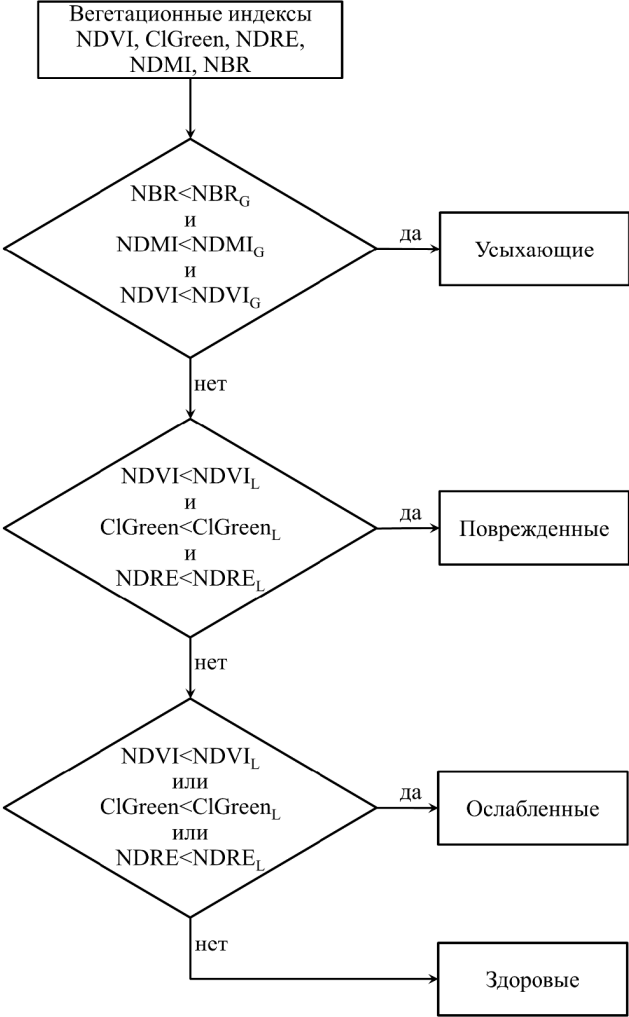


Рис. 4. Алгоритм классификации жизненного состояния по глобальным и локальным пороговым значениям вегетационных индексов

Fig. 4. The vital status classification algorithm based on global and local thresholds of vegetation indices

Для оценки жизненного состояния сербской ели мы вводим 4 класса: здоровые, ослабленные, поврежденные и усыхающие. В нашем случае к классу усыхающих также относятся и различные виды сухостоя [5]. Мы рассматриваем 2 типа референсных значений вегетационных индексов: глобальные (VI_G) и локальные (VI_L). Глобальные соответствуют общепринятым пороговым значениям вегетационных индексов, по которым выделяются области высокой степени угнетения растительного покрова. К усыхающим мы отнесли пиксели, для которых индексы NBR, NDMI и NDVI не превышают соответствующих глобальных пороговых значений NBR_G , $NDMI_G$ и $NDVI_G$. В качестве локальных референсных значений мы использовали процентные точки (от 1 до 5 %) распределения вегетационных индексов для целевого объекта на изучаемой территории. Пиксели, не относящиеся к классу усыхающих, для которых все значения NDVI, ClGreen и NDRE меньше соответствующих локальных референсных значений $NDVI_L$, $ClGreen_L$ и $NDRE_L$, мы классифицировали как поврежденные. Пиксель относится к классу здоровых, если все значения NDVI, ClGreen и NDRE больше или равны соответствующим $NDVI_L$, $ClGreen_L$ и $NDRE_L$. В противном случае пиксель входит в класс ослабленных.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты сегментации объектов на различных этапах тематической обработки представлены на рис. 5. Для построения маски вечнозеленых пород деревьев (рис. 5, б) оказалось достаточным использовать только значения NDVI, рассчитываемые по изображениям в осенний и весенний периоды. Поскольку обследуемая территория обладает сложной орографией, фенологические изменения листопадных видов деревьев и луговой растительности происходят в различные даты в зависимости от высоты над уровнем моря. При использовании изображений за 22.10.2019, 20.03.2020 и 09.04.2020 для всех 3 рассматриваемых алгоритмов классификации (SVM, ECOC и FCNN) точность кросс-валидации составила 100 %. Данную точность можно получить и для некоторых других комбинаций изображений, однако указанной комбинации соответствовало минимальное различие между результатами классификации различными методами. Таким образом, для 4 % пикселей, относящихся к маске вечнозеленых видов (цветные пиксели на рис. 5, б), наблюдалась неопределенность ответов классификаторов.

Для более тонкой классификации на последующих этапах дополнительно к NDVI мы также использовали индексы ClGreen и NDRE. При построении масок лиственных видов, луговой растительности и открытых почв (рис. 5, г) наиболее информативными оказались сентябрьские снимки за 2015 и 2018 гг. На основе метода повторных выборок были рассчитаны доверительные интервалы для оценок полной вероятности ошибок (табл. 2). Для алгоритма FCNN полная вероятность ошибки составила в среднем несколько меньшую величину, чем для алгоритмов KNN и ECOC, однако, поскольку доверительные интервалы имеют существенное перекрытие, данное значение не является статистически значимым. Различие между оценками кросс-валидации для ошибок TOE и TCE не превышало 1 %, что свидетельствует о сбалансированности обучающих данных. Разница между методами наблюдалась для 14 % пикселей.

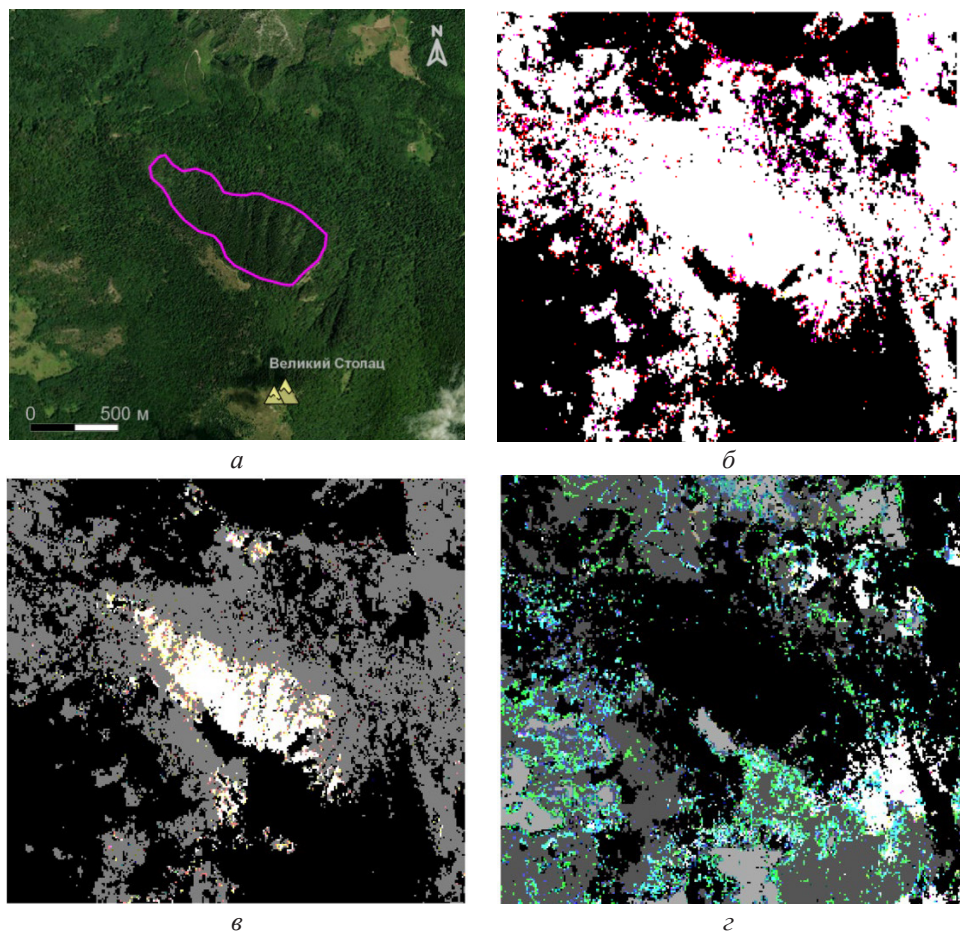


Рис. 5. Маски распознаваемых объектов на различных этапах алгоритма сегментации многовременных изображений Sentinel-2: *а* – RGB-изображение района исследования; *б* – маска вечнозеленых древостоев (белый); *в* – маски хвойных древостоев (белый – ель сербская, серый – ель европейская); *г* – маски прочих объектов (темно серый – лиственные, светло серый – почва и травянистые, белый – смешанные древостои). Цветные пиксели характеризуют различия результатов классификации с помощью рассматриваемых алгоритмов

Fig. 5. The masks of the objects recognized at different stages of the Sentinel-2 multi-temporal image segmentation algorithm: *a* – RGB-image of the study area; *б* – mask of evergreen stands (white); *в* – masks of coniferous stands (white – Serbian spruce, grey – European spruce); *г* – masks of other objects (dark grey – deciduous, light gray – soil and grass, white – mixed stands). The coloured pixels characterize the differences in classification results using the algorithms under consideration

Таблица 2

Доверительные интервалы оценки полной вероятности ошибки классификации основных типов объектов различными методами (%)

The confidence intervals of the total classification error for the main object types recognized by different methods (%)

Тип объекта	FCNN	KNN	ECOC
Лиственные, смешанные леса, луга и почвы	0,2–0,9	0,5–1,2	0,2–1,2
Хвойные	0,5–1,6	0,6–1,2	0,6–1,2

При построении масок хвойных видов (рис. 5, в), наибольшую точность удалось достичь при использовании июльских снимков за 2015 и 2020 гг. В данном случае алгоритм FCNN показал несколько худший результат, однако ухудшение оказалось незначимым. Неопределенность результатов в случае применения различных алгоритмов составила всего 2 % и соответствующие пиксели лежат в большей части на границе маски сербской ели.

Результат сегментации основных типов объектов района исследования представлен на рис. 6. Большая часть территории соответствует однородным хвойным и лиственным насаждениям. Общая площадь насаждений сербской ели, по нашим оценкам, до 2020 г. включительно составляла 35,2 га. Пиксели, для которых наблюдалась неопределенность результатов классификации (класс неопределенных на рис. 6), были исключены из рассмотрения как при оценке площадей распознаваемых объектов, так и при анализе динамики вегетационных индексов. Естественная погрешность площади целевого вида не превышает 1,2 га.

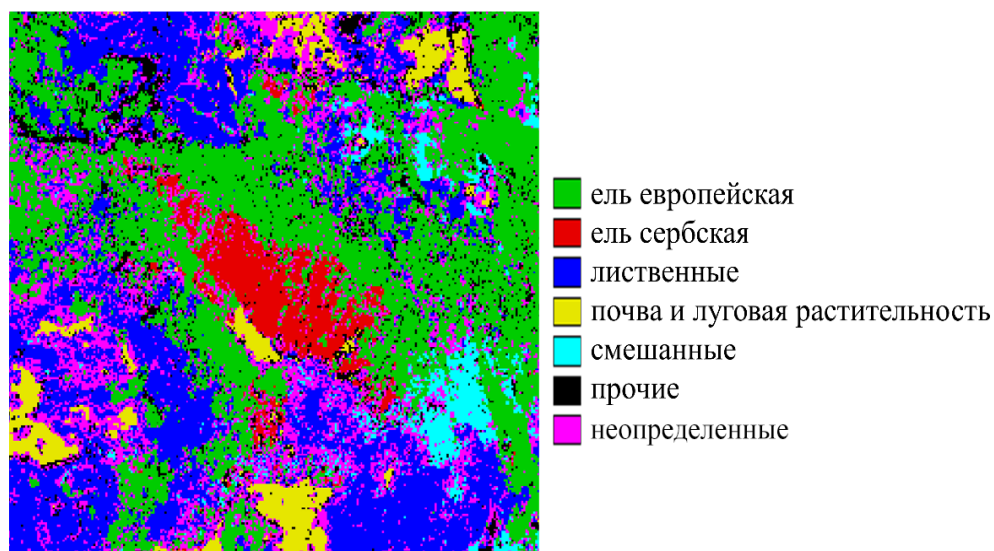


Рис. 6. Результат сегментации основных типов объектов района исследования

Fig. 6. The result of segmentation of the main types of objects in the study area

Летом 2021 г. северный склон горы Великий Столац был охвачен лесным пожаром, в ходе которого пострадала значительная часть насаждений сербской ели. Начало пожара было зафиксировано 27 июля. Его большая часть протекала по низовому типу с различной степенью интенсивности. В августе 2021 г. инициированы мероприятия по тушению пожара, которые успешно завершились 6 сентября. Таким образом, для проведения анализа годовой динамики вегетационных индексов данные наблюдений были разделены по 3 периодам: нормальный – 2015–2020 гг. (до пожара), пирогенный – 2021 г. (год пожара) и восстановительный – 2022–2024 гг. (после пожара). Результаты представлены на рис. 7. Точечные данные по указанным периодам обозначены соответственно крестами, ромбами и кругами. Сплошные линии являются регрессионными моделями на основе гауссовских процессов [37], построены по точечным данным соответствующего цвета.

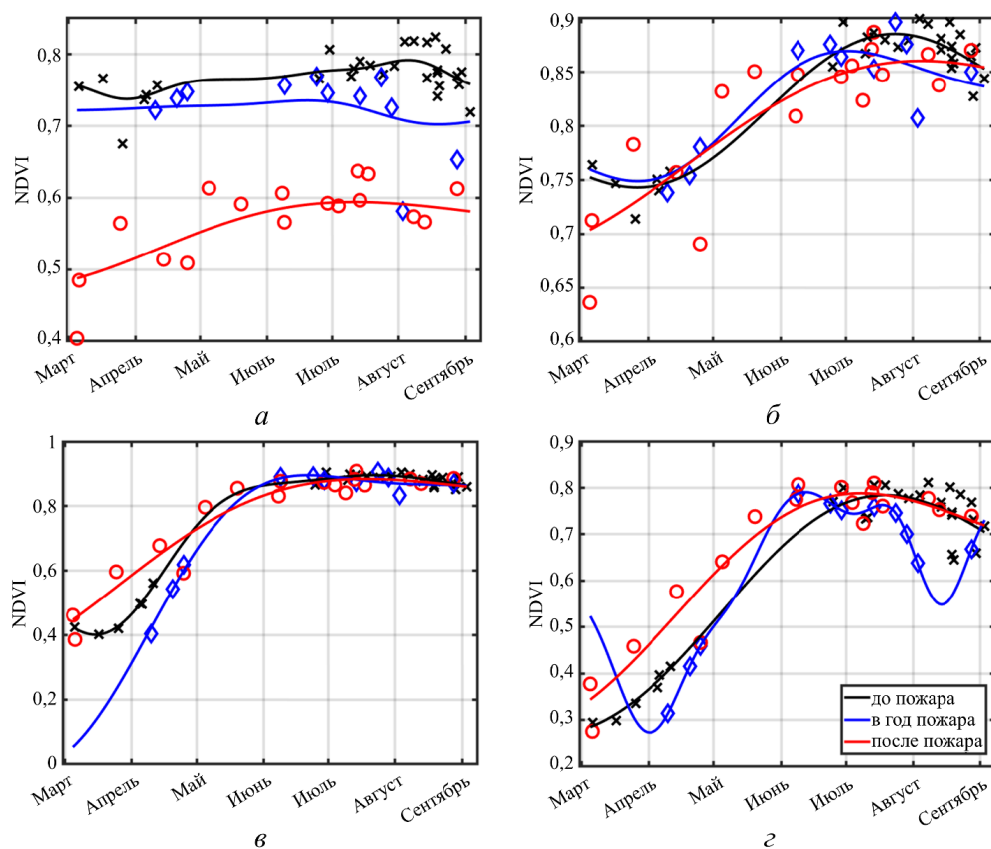


Рис. 7. Годовая динамика среднего индекса NDVI для основных типов объектов по 3 периодам: *а* – ель сербская; *б* – ель европейская; *в* – лиственные; *г* – луговая растительность

Fig. 7. The annual dynamics of the average NDVI across the main object types over 3 time periods: *a* – Serbian spruce; *б* – Norway spruce; *в* – deciduous species; *г* – meadow vegetation

Как можно видеть на рис. 7, *а*, сербская ель не имеет значимых годовых изменений NDVI в нормальный период. Характерные значения данного индекса составляют 0,75–0,8. В пирогенный период NDVI также остается на уровне 0,75 вплоть до июля. В августе вследствие пожара происходит резкое снижение NDVI до 0,6, которое сохраняется в течение восстановительного периода.

Насаждениям ели европейской (рис. 7, *б*) соответствуют несколько большие средние значения NDVI, которые изменяются от 0,75 в марте и апреле до 0,85 с июня по сентябрь. Наиболее выраженную годовую динамику среднего значения NDVI имеют лиственные древостой и луговая растительность (рис. 7, *в*, *г*). В конце марта и начале апреля листва отсутствует, таким образом, лугам соответствуют средние показатели NDVI порядка 0,3, а лиственным древостоям – порядка 0,4. Несколько большие NDVI для лиственных древостоев объясняются наличием незначительных примесей ели европейской и пихты белой, которых, тем не менее, было недостаточно для отнесения соответствующих участков к древостоям смешанного типа. В период с июня по сентябрь лиственным древостоям характерны стабильные значения NDVI около 0,85–0,9, а луговой растительности – 0,75–0,8.

Для всех классов, за исключением сербской ели, регрессионные модели в нормальный, пирогенный и восстановительный периоды практически совпадают. Некоторое различие регрессионных моделей для луговой растительности объясняется большей чувствительностью к засухам. Так, например, для пирогенного периода на рис. 7, *г* можно наблюдать видимое снижение NDVI в августе. Для насаждений сербской ели в восстановительный период характер регрессионной модели NDVI меняется – появляется годовой ход от 0,5 до 0,6, который объясняется появлением луговой и кустарниковой растительности на выгоревших участках. Также для данного объекта увеличивается разброс данных по сравнению с нормальным периодом.

Глобальные пороговые значения индексов NBR, NDMI и NDVI были приняты равными 0, –0,1 и 0,35 соответственно. Данные значения вегетационных индексов характеризуют древостои с полным пожелтением или отсутствием листвы, испытывающие сильный водный стресс. Диапазоны локальных пороговых значений приведены в табл. 3. В данной работе для оценки повреждений мы использовали 1%-е пороговые значения, что соответствует наиболее оптимистичному сценарию.

Таблица 3

**Локальные пороговые значения вегетационных индексов
для насаждений сербской ели**
The local thresholds of vegetation indices for Serbian spruce stands

Индекс	Процентиль 5 %	Процентиль 1 %
NDVI	0,67	0,56
CIGreen	2,8	2,2
NDRE	0,40	0,29
NBR	0,43	0,28
NDMI	0,15	0,03

Первоначальные повреждения от пожара оценивались по индексу ΔNBR , для расчета которого использовались изображения, сделанные непосредственно до начала и сразу после окончания пожара (08.07.2021 и 11.09.2021 соответственно). Средний и высокий уровень повреждений маркируется пикселями, для которых $\Delta NBR > 0,27$. Такие повреждения, как правило, являются последствиями верхового пожара. Таким образом, по нашим оценкам, в 2021 г. полностью выгорело около 1 га насаждений сербской ели. Последствия низового пожара характеризуются значениями $0,27 \geq \Delta NBR > 0,1$. Соответствующие повреждения получили насаждения на площади 6,5 га (без повреждений – 27,7 га).

Для отнесения насаждений сербской ели к классам по степени повреждения в восстановительный период были выбраны изображения 17 насаждений с минимальными искажениями спектральных характеристик. Оценки площадей, соответствующих классам повреждений, существенно варьируют, характерные изменения – 20–40 % от среднего. В целом за восстановительный период не выявлено значимых трендов, свидетельствующих о положительной или отрицательной динамике восстановления растительного покрова (рис. 8). Средние оценки площадей классов повреждений за восстановительный период следующие: здоровые – 17,6 га; ослабленные – 8,4 га; поврежденные – 8,0 га; усыхающие – 1,2 га. Итак, около 40 % насаждений сербской ели получили серьезные повреждения.

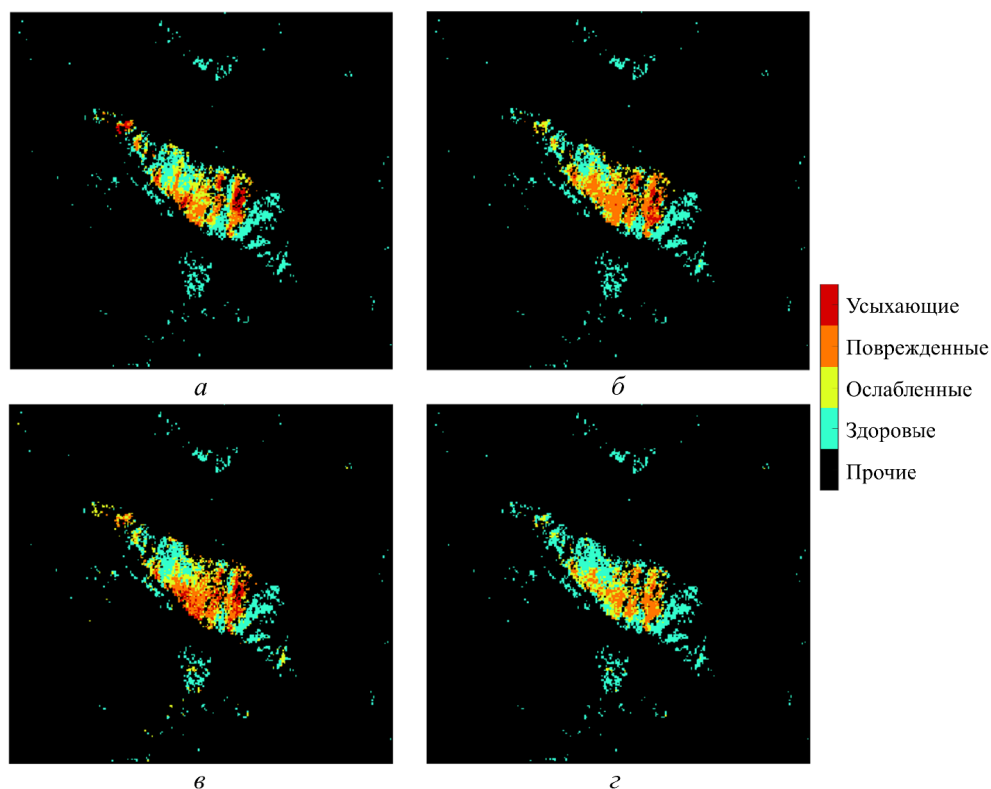


Рис. 8. Результаты классификации жизненного состояния древостоев на участках обитания сербской ели в районе горы Великий Столац за различные даты в течение 3-летнего периода после тушения пожара: *а* – 18.07.2022; *б* – 28.07.2023; *в* – 08.04.2024; *г* – 27.07.2024

Fig. 8. The results of the classification of stands' vital status in the areas inhabited by Serbian spruce located in the Mount Veliki Stolac area for different dates over a 3-year period after fire extinguishing: *a* – 18.07.2022; *б* – 28.07.2023; *в* – 08.04.2024; *г* – 27.07.2024

В течение первых 2 лет после пожара изменения классов жизненного состояния носят случайный характер. Например, для июльских снимков за 2022 и 2023 гг. можно наблюдать изменения классов повреждения на 1–2 га. При этом основное местоположение района, наиболее пострадавшего от пожара, сохраняется. Изменения такого рода объясняются в первую очередь погрешностями атмосферной и топографической коррекции.

Для 2024 г. наблюдается повышение уровня состояния древостоев на выбранном участке в летние месяцы по сравнению с весенним периодом. Это хорошо заметно по изображениям на рис. 8 за апрель и июль 2024 г. Данный эффект объясняется началом замещения насаждений сербской ели наиболее поврежденных участков лиственным подростом и кустарниковой растительностью. Насаждения сербской ели в восточной и западной частях склона горы Великий Столац относятся к классу здоровых для всех изображений восстановительного периода, таким образом, можно считать, что они не получили повреждений вследствие пожара. Однако, учитывая локальную орографию (сохранившиеся насаждения отделены ущельями от наиболее поврежденной области), а также низкую энергию роста сербской ели по

сравнению с местными лиственными видами, мы не можем рассчитывать на естественное лесовозобновление популяции сербской ели в данном районе. Таким образом, для сохранения популяции данного исчезающего реликтового вида рекомендуется проведение специальных лесовосстановительных мероприятий.

Заключение

Представленный метод тематической обработки многовременных много-спектральных изображений среднего пространственного разрешения является эффективным инструментом дистанционного мониторинга изменений жизненного состояния древостоев, в т. ч. редких и исчезающих видов деревьев. Приведено обоснование выбора используемых вегетационных индексов, дат съемки и расчета пороговых значений спектральных характеристик. Результаты обработки с помощью данного метода спутниковых изображений Sentinel-2 (L2A) за последние 10 лет позволили оценить диапазоны спектральных характеристик здоровых насаждений сербской ели, а также повреждения и динамику восстановления вида в районе горы Великий Столац (Республика Сербская) после пирогенного воздействия в 2021 г.

По итоговым оценкам, 3 % от общей площади насаждений сербской ели было уничтожено верховым пожаром и 18,5 % получило первичные повреждения. Анализ спутниковых данных за последующие 3 года показал, что в реальности низовой пожар затронул гораздо большую область – около 50 % территории насаждений сербской ели. Зоной наибольшего поражения популяции сербской ели является центральная часть северного склона горы Великий Столац. Около 26 % насаждений имели сильные повреждения, которые, скорее всего, приведут к гибели особей. К классу ослабленных можно отнести 24 % общей площади насаждений. Для данных участков возможно естественное восстановление.

Анализ спутниковых изображений за 2024 г. позволяет обоснованно предположить, что в настоящее время начался процесс заселения территорий, поврежденных лесным пожаром, лиственными видами, при этом значимых тенденций к улучшению жизненного состояния популяции сербской ели не наблюдается. Таким образом, для сохранения популяции необходимо проведение работ по лесовосстановлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дмитриев Е.В., Козуб В.А., Мельник П.Г., Соколов А.А., Сафонова А.Н. Классификация и оценка состояния смешанных древостоев по аэроизображениям сверхвысокого пространственного разрешения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 9–24.

Dmitriev E.V., Kozub V.A., Melnik P.G., Sokolov A.A., Safonova A.N. Classification and Assessment of the State of Mixed Forests from Very High Spatial Resolution Airborne Images. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 5, pp. 9–24. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.9>

2. Дмитриев Е.В., Мельник П.Г., Донской С.А., Кондранин Т.В. Повышение эффективности текстурной сегментации лесного полога по изображениям сверхвысокого пространственного разрешения // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 5. С. 25–36.

Dmitriev Y.V., Melnik P.G., Donskoy S.A., Kondranin T.V. Improving Efficiency of Tree Canopy Texture Segmentation by Using Very High Spatial Resolution Satellite Images. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 25–36. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-25-36>

3. Кобельков М.Е., Чуканов М.А., Хотин Д.В. Категории состояния основных лесообразующих пород Московской области. М., 2000. 40 с.

Kobel'kov M.E., Chukanov M.A., Khotin D.V. *Condition Categories of the Main Forest-Forming Species in the Moscow Region*. Moscow, 2000. 40 p. (In Russ.).

4. Коломыц Э.Г., Севостьянов С.М. Ландшафтно-экологическая стратегия геосистемного мониторинга лесов в условиях современного потепления // Проблемы региональной экологии. 2022. № 4. С. 39–47.

Kolomyts E.G., Sevost'yanov S.M. Landscape-Ecological Strategy for Forest Geosystem Monitoring under the Conditions of Modern Warming. *Problemy regionalnoj ekologii* = Regional Environmental Issues, 2022, no. 4, pp. 39–47. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-4-39-47>

5. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Пашенова Н.В., Демидко Д.А., Пет'ко В.М., Баранчиков Ю.Н. Уссурийский полиграф в лесах Сибири (распространение, биология, экология, выявление и обследование поврежденных насаждений): метод. пособие. Томск; Красноярск, 2015. 48 с.

Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Pashenova N.V., Demidko D.A., Pet'ko V.M., Baranchikov Yu.N. *Four-Eyed Fir Bark Beetle in Siberian Forests (Distribution, Biology, Ecology, Detection and Survey of Damaged Stands): Study Guide*. Tomsk, Krasnoyarsk, 2015. 48 p. (In Russ.).

6. Лазарева А.А., Слаута А.А., Афонина Т.Е. Мониторинг геосистем особо охраняемых природных территорий в условиях антропогенной нагрузки // Наука. Инновации. Технологии. 2019. № 1. С. 35–46.

Lazareva A.A., Slauta A.A., Afonina T.E. Monitoring Geosystems of Specially Protected Natural Territories in the Conditions of Anthropogenous Load. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii* = Science. Innovations. Technologies, 2019, no. 1, pp. 35–46. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37495/2308-4758-2019-1-35-46>

7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004. 343 с.

Osovskij S. *Neural Networks for Information Processing*. Trans. from Pol. by I.D. Rudinskij. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004. 343 p. (In Russ.).

8. Adamović L. *Die Vegetationsverhältnisse der Balkanländer (Mösische Länder): umfassend Serbien, Altserbien, Bulgarien, Ostrumelien, Nordthrakien und Nordmazedonien*. Leipzig, Engelmann Verlag, 1909. 567 p. (In Germ.).

9. Adjognon G.S., Rivera-Ballesteros A., van Soest D. Satellite-Based Tree Cover Mapping for Forest Conservation in the Drylands of Sub Saharan Africa (SSA): Application to Burkina Faso Gazetted Forests. *Development Engineering*, 2019, vol. 4, art. no. 100039. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2018.100039>

10. Aleksić J.M., Ballian D., Isajev D., Mataruga M., Christian T., Gardner M. *Picea omorika*. The IUCN Red List of Threatened Species, 2017. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T30313A84039544.en>

11. Ballian D. Kontrola podrijetla Pančičeve omorike (*Picea omorika* Panč./ Purk.) iz plantaže kod Kaknja pomoću izoenzimskih biljega. *Šumarski list*, 2006, vol. 130, no. 7–8, pp. 295–304. (In Serb.).

12. Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R.J., Li H., Moran M.S. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*. USA, Minnesota, Bloomington, 2000. 15 p.

13. Boiarskii B., Hasegawa H. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 2019, spec. iss. no. 4, pp. 20–29.
<https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
14. Burschel P. Die Omorikafichte. *Forstarchiv*, 1965, vol. 36, pp. 113–131. (In Germ.).
15. Čolić D. Porijeklo i sukcesija šumskih zajednica sa Pančičevom omorikom (*Picea omorika* Panč.) na planini Tari. *Zaštita prirode*, 1965, vol. 29–30, pp. 65–90. (In Serb.).
16. Čolić D. Požar kao ekološki faktor u sukcesiji zajednica Pančičeve omorike i redukovanju njenog areala. *Zaštita prirode*, 1966, vol. 33, pp. 1–167. (In Serb.).
17. Čolić D. Spontana obnova Pančičeve omorike (*Picea omorika* Panč.) posle požara. *Zaštita prirode*, 1987, vol. 40, pp. 37–56. (In Serb.).
18. Dietterich T.G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1995, vol. 2, pp. 263–286.
<https://doi.org/10.1613/jair.105>
19. Dizdarević M., Lakušić R., Grgić P., Kutleša L., Pavlović B., Jonlija R. Ekološke osnove poimanja reliktnosti vrste *Picea omorica* Pančić. *Bilten Društva ekologa BiH, Serija A*, 1984, vol. 2, pp. 7–56. (In Serb.).
20. Dmitriev E.V. Classification of the Forest Cover of Tver Oblast Using Hyperspectral Airborne Imagery. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, vol. 50, pp. 929–942. <https://doi.org/10.1134/s0001433814090072>
21. Dmitriev E.V., Kondranin T.V., Zotov S.A. Segmentation of Natural and Anthropogenic Objects by Panchromatic Satellite Images Using Statistical Textural Features. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2022, vol. 58, pp. 167–179.
<https://doi.org/10.3103/s8756699022020029>
22. Fukarek P. Staništa Pančičeve omorike nakon šumskih požara u 1946/47 godini. *Šumarski list*, 1951, vol. 75, pp. 61–75. (In Serb.).
23. Fukarek P., Fukarek Đ. Sukcesivni niz subasocijacija unutar zajednica omorike (*Piceetum omorikae* Tregubov, emend. P. Fukarek) u njenim sastojinama u istočnoj Bosni. *Šumarski list*, 1989, vol. 113, no. 11–12, pp. 567–580. (In Serb.).
24. Gao B.-c. NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, iss. 3, pp. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3,1996.A](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3,1996.A)
25. Gitelson A.A., Viña A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J. Remote Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Crops. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, iss. 8. art. no. L08403. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
26. Govedar Z., Krstić M., Stanivuković Z. Categorisation of Trees in Serbian Spruce Natural Stands in the Region of Govza in the Republic of Srpska. *50 Godini Lesotehnički Univerzitet*. Bulgaria, Sofia, 2003, pp. 96–101.
27. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*: 2nd ed. New York, Springer, 2009. 745 p.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
28. Hou W., Li D., Xu C., Zhang H., Li T. An Advanced k Nearest Neighbor Classification Algorithm Based on KD-tree. *2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI)*. China, Chongqing, 2018, pp. 902–905.
<https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690508>
29. IUCN, 2021. *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2020-3. Available at: <https://www.iucnredlist.org/> (accessed 15.08.24).
30. Ivetić V., Aleksić J.M. Response of Rare and Endangered Species *Picea omorika* to Climate Change – The Need for Speed. *Reforesta*, 2016, vol. 2, pp. 81–99.
<https://doi.org/10.21750/REFOR.2.09.24>
31. Keeley J.E. Fire Intensity, Fire Severity and Burn Severity: a Brief Review and Suggested Usage. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, vol. 18, iss. 1, pp. 116–126.
<https://doi.org/10.1071/WF07049>

32. Knipling E.B. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1970, vol. 1, iss. 3, pp. 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)
33. Mataruga M., Milanović Đ., Čurić A. *Smjernice za očuvanje Pančićeve omorike – in situ*. Republic Institute for the Protection of Cultural, Historical and Natural Heritage, 2024. 83 p. (In Serb.).
34. Mataruga M., Piotti A., Daničić V., Cvjetković B., Fussi B., Konner M., Vendramin G.G., Aleksić J.M. Towards the Dynamic Conservation of Serbian Spruce (*Picea omorika*) Western Populations. *Annals of Forest Science*, 2020, vol. 77, art. no. 1. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0892-1>
35. Maly M. Beiträge zur Kenntnis der *Picea omorika*. *Glasnik Zemaljsk. Muzeja BiH*, 1934, vol. 46, pp. 37–64. (In Germ.).
36. Pančić J. *Omorika nova fela četinara u Srbiji*. Beograd, Težak, 1887, vol. XVIII, no. 1, pp. 1–8. (In Serb.).
37. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. *Gaussian Processes for Machine Learning*. Massachusetts, Cambridge, MIT Press, 2006. 247 p. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3206.001.0001>
38. Rouse J.W.Jr., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symposium*, 1974, vol. 1, pp. 48–62.
39. Shaw R.G., Etterson J.R. Rapid Climate Change and the Rate of Adaptation: Insight from Experimental Quantitative Genetics. *New Phytologist*, 2012, vol. 195, iss. 4, pp. 752–765. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04230.x>
40. Scogings P.F. Perspective: Monitoring Global Forests Using Only Structural Metrics – Problems and Solutions from a Savanna Viewpoint. *Forest Ecology and Management*, 2023, vol. 546, art. no. 121381. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121381>
41. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 81, iss. 2–3, pp. 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
42. Stojanović O. Prirast i oblik stabla Pančićeve omorike na njenom prirodnom staništu. *Radovi Šumarskog fakulteta i Instituta za šumarstvo i drvnu industriju u Sarajevu*, 1959, vol. 7(4), pp. 163–188. (In Serb.). <https://doi.org/10.54652/rsf.1959.v7.i4.403>
43. Taloor A.K., Manhas D.S., Kothiyari G.C. Retrieval of Land Surface Temperature, Normalized Difference Moisture Index, Normalized Difference Water Index of the Ravi Basin using Landsat Data. *Applied Computing and Geosciences*, 2021, vol. 9, art. no. 100051. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100051>
44. Talukdar N.R., Ahmad F., Goparaju L., Choudhury P., Arya R., Qayum A., Rizvi J. Forest Fire Estimation and Risk Prediction Using Multispectral Satellite Images: Case Study. *Natural Hazards Research*, 2024, vol. 4, iss. 2, pp. 304–319. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.007>
45. Tomppo E., Olsson H., Ståhl G., Nilsson M., Hagner O., Katila M. Combining National Forest Inventory Field Plots and Remote Sensing Data for Forest Databases. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112, iss. 5, pp. 1982–1999. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.032>
46. Tošić M. O jednom novom nalazištu pančićeve omorike (*Picea omorika* Pančić) u Srbiji. *Radovi ANUBiH. Odjeljenje prirodnih i tehničkih nauka*, 1983, vol. 72(21), pp. 267–274. (In Serb.).
47. Vapnik V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory*: 2nd ed. New York, Springer, 1999. 314 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3264-1>
48. Wang S., Li H., Niu S. Empirical Research on Climate Warming Risks for Forest Fires: A Case Study of Grade I Forest Fire Danger Zone, Sichuan Province, China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 14, art. no. 7773. <https://doi.org/10.3390/su13147773>

49. Wang X.-Q., Ran J.-H. Evolution and Biogeography of Gymnosperms. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2014, vol. 75, pp. 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2014.02.005>
50. Wang H., Shao X.-m., Jiang Y., Fang X.-q., Wu S.-h. The Impacts of Climate Change on the Radial Growth of *Pinus koraiensis* along Elevations of Changbai Mountain in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 289, pp. 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.023>
51. Wettstein R. Das Vorkommen der *Picea Omorica* (Panč.) Willk. in Bosnien. *Oesterreichische botanische Zeitschrift*, 1890a, vol. 40, no. 10, pp. 357–361. (In Germ.).
52. Wettstein R. Die Omorika-Fichte, *Picea omorika* (Panč.). Eine monographische Studie. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 1890b, vol. 99, no. 10, pp. 502–565. (In Germ.).
53. Woinarski J.C.Z., Legge S., Lindenmayer D.B., Robinson N.M., Scheele B.C., Southwell D.M., Wintle B.A. A Framework for Evaluating the Adequacy of Monitoring Programs for Threatened Species. *Monitoring Threatened Species and Ecological Communities*. Clayton, CSIRO Publ., 2018, pp. 13–20.
54. Woodmansee R.G., Wallach L.S. Effects of Fire Regimes on Biogeochemical Cycles. *Fire Regimes and Ecosystem Properties*: Proceedings of the Conference. Washington, D.C., USDA Forest Service, General Technical Report WO-GTR-26, 1981, pp. 379–400.
55. Xie D., Du H., Xu W.-H., Ran J.-H., Wang X.-Q. Effects of Climate Change on Richness Distribution Patterns of Threatened Conifers Endemic to China. *Ecological Indicators*, 2022, vol. 136, art. no. 108594. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108594>
56. Xu Y., Zang R. Conservation of Rare and Endangered Plant Species in China. *iScience*, 2023, vol. 26, iss. 2, art. no. 106008. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106008>

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

Original article

УДК 581.412:581.824.1:630.181

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-33-47

A Strategy for Adapting the Hydraulic System of Woody Plants to Various Tiers of the Floodplain Forest of the Enmyvaam River (Chukotka)

Evgenia S. Chavchavadze¹, Doctor of Biology; ResearcherID: [KCK-3338-2024](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5508-3403>

Roman V. Shchekalev²✉, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAH-3861-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7657-1705>

Alexander A. Grabovskiy¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [ABM-4362-2022](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5244-6985>

Veronika O. Romanova¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [KCK-3302-2024](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3892-356X>

¹Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, ul. Professora Popova, 2P, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation; echavcha@yandex.ru, paleochukotka@gmail.com, vromanova@binran.ru

²Saint-Petersburg State Forest Technical University named S.M. Kirov, per. Institutskiy, 5U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; schekalevrv@yandex.ru✉

Received on May 19, 2024 / Approved after reviewing on October 26, 2024 / Accepted on October 28, 2024

Abstract. The article examines the features of the anatomical structure of the hydraulic system of 17 species from 13 genera of 6 families of woody flowering plants, which belong to different tiers of the floodplain forest growing along the Enmyvaam River (hypoarctic tundra). It has been found that 1st-tier trees have the most advanced hydraulic system. It consists only of libriform fibers and vascular segments of a short-cylindrical, cylindrical fibrous shape with simple perforations, punctate alternate, closed, and close-set intervacular porosity, single-row, mostly homogeneous rays, apotracheal and paratracheal parenchyma. This is most likely due to the particularly intense water exchange regime in tall trees, whose crowns are more susceptible to harsh environmental influences. Shrubs and low-growing trees of the 2nd tier demonstrate the presence of both archaic and evolutionarily advanced features in approximately equal quantities in the stem wood. For example, in the genera *Alnus* and *Sorbus*, there is a combination of libriforms with fibrous and vascular tracheids; vessel segments with scalariform, reticulate, and simple perforations, apotracheal and paratracheal parenchyma, and heterogeneous and homogeneous palisade rays. As for the species of the genus *Salix*, they have a highly developed hydraulic system, similar to that of the 1st-tier plants. Small shrubs and dwarf shrubs of the 3rd tier, living in areas with excessive absolute and relative humidity and sometimes extremely low lighting, have the widest range of specific adaptive features acquired as a result of adaptation to the extreme conditions of high latitudes.

Keywords: xylem, wood, water-conducting tissue, hydraulic system, woody plants, adaptation, floodplain forest, tundra

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the topic “Evolutionary and Ecological Patterns of the Structural and Systematic Diversity of Modern and Fossil Plants Based on the Collection Funds of the Botanical Museum of the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg)”.



For citation: Chavchavadze E.S., Shchekalev R.V., Grabovskiy A.A., Romanova V.O. A Strategy for Adapting the Hydraulic System of Woody Plants to Various Tiers of the Floodplain Forest of the Enmyvaam River (Chukotka). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 33–47. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-33-47>

Научная статья

Стратегия адаптации гидросистемы древесных растений к различным ярусам пойменного леса реки Энмываам (Чукотка)

Е.С. Чавчавадзе¹, д-р биол. наук; *ResearcherID*: [KCK-3338-2024](https://orcid.org/0000-0001-5508-3403),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5508-3403>

Р.В. Щекалев^{2✉}, д-р с.-х. наук; *ResearcherID*: [AAH-3861-2019](https://orcid.org/0000-0001-7657-1705),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7657-1705>

А.А. Грабовский¹, мл. науч. сотр.; *ResearcherID*: [ABM-4362-2022](https://orcid.org/0000-0001-5244-6985),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5244-6985>

В.О. Романова¹, мл. науч. сотр.; *ResearcherID*: [KCK-3302-2024](https://orcid.org/0000-0002-3892-356X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3892-356X>

¹Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, ул. Профессора Попова, д. 2, лит. П, Санкт-Петербург, Россия, 197022; echavcha@yandex.ru, paleochukotka@gmail.com, vromanova@binran.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; schekalevr@yandex.ru✉

Поступила в редакцию 19.05.24 / Одобрена после рецензирования 26.10.24 / Принята к печати 28.10.24

Аннотация. Рассмотрены особенности анатомического строения гидросистемы 17 видов из 13 родов 6 семейств древесных цветковых растений, которые относятся к различным ярусам пойменного леса, произрастающего вдоль реки Энмываам (гипоарктическая тундра). Выяснено, что деревья 1-го яруса обладают наиболее совершенной водопроводящей системой. В ее состав входят только волокна либриформа и членики сосудов коротко-цилиндрической, цилиндрической волокновидной формы с простыми перфорациями, точечной очередной, сомкнутой и сближенной межсосудистой поровостью, 1-рядные в основном гомогенные лучи, апотрахеальная и паратрахеальная паренхима. Это связано, скорее всего, с особо напряженным режимом водного обмена у высокоствольных деревьев, кроны которых сильнее подвержены влиянию окружающей среды. Кустарники и низкорослые деревья 2-го яруса демонстрируют наличие в древесине ствола в примерно равных количествах как архаичных, так и эволюционно продвинутых черт. Например, у родов *Alnus* и *Sorbus* наблюдается сочетание либриформа с волокнистыми и сосудистыми трахеидами; члеников сосудов с лестничными, сетчатыми и простыми перфорациями, апотрахеальной и паратрахеальной паренхимы, гетерогенных и гомогенно-палисадных лучей. Что касается видов рода *Salix*, то они обладают близкой к совершенной гидросистемой, как и представители растений 1-го яруса. Небольшие кустарники и кустарнички 3-го яруса, обитающие в местах с избыточной абсолютной и относительной влажностью и порой чрезвычайно слабым освещением, характеризуются самым большим диапазоном специфических приспособительных особенностей, приобретенных в результате адаптации к экстремальным условиям высоких широт.

Ключевые слова: ксилема, древесина, водопроводящая ткань, гидросистема, древесные растения, адаптация, пойменный лес, тундра

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы «Эволюционные и экологические закономерности структурного и систематического разнообразия современных и ископаемых растений на основе коллекционных фондов Ботанического музея Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (г. Санкт-Петербург)».

Для цитирования: Chavchavadze E.S., Shchekalev R.V., Grabovskiy A.A., Romanova V.O. A Strategy for Adapting the Hydraulic System of Woody Plants to Various Tiers of the Floodplain Forest of the Enmyvaam River (Chukotka) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 33–47. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-33-47>

Introduction

A floodplain forest is a special type of forest biocenosis that grows in a temporarily flooded area of a river valley (floodplain). In Russia, these forests are found in all natural zones, from arid steppes to tundra. The highest density of forest stands is observed in taiga floodplain forests, where canopy closure reaches 80 %, while in the southern and northern directions it decreases to 15 % [9]. The species composition of woody plants in floodplain forests depends on climatic conditions, flooding schedule, chemical composition of water and soil sediments, as well as the thickness and the granulometric composition of the latter.

In the wettest areas with prolonged flooding, particularly resistant plants grow, such as birch, wild rosemary, currant and, above all, willow [13, 16, 18].

Floodplain forests have a beneficial effect on the climate, strengthen the soil, improve water use conditions, and provide habitats for commercial fish, birds, and animals. Moreover, in the dry steppes and tundra, these forests are the only source of wood, which is widely used by the local population in their economy.

We have surveyed the forested plain in the lower reaches of the Enmyvaam River, which originates from Lake Elgygytyn and flows into the Belaya River (the Anadyr River basin) (Fig. 1).

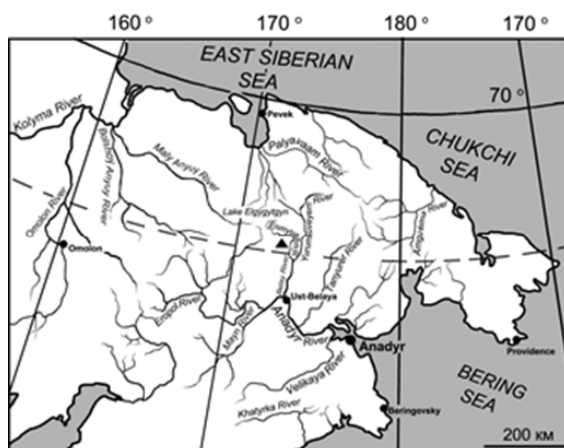


Fig. 1. The area of interest

In the upper and middle reaches, the Enmyvaam River flows through a mountain range, and in its lower reaches, through a plain surrounded by swamps and small lakes. The river is 285 km long, with the floodplain on both sides of the main channel

extending in width from 500 to 1,000 m or more. The characteristic appearance of the river phytocenosis (Fig. 2) is provided by the chosenia forests of different ages, which, combined with fragrant poplar, tall willows and grass-shrub populations, occupies almost its entire space [18].



Fig. 2. The photos of forest floodplain phytocenoses along the Enmyvaam River:

a – the left bank of the middle reaches of the Enmyvaam River, the beginning of the chosenia forest; *b* – the right bank of the Enmyvaam River near the confluence of the Telerennatveem River: 1st tier – *Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. Skvorts; 2nd tier – *Salix schwerinii* E.L. Wolf, *Salix boganidensis* Trautv.; 3rd tier – *Betula divaricata* Ledeb., *Ribes triste* Pall., *Rosa acicularis* Lindl.; *c* – the lower reaches of the Enmyvaam River, the Ust-Belsky reindeer herding farm «Sernaya». Poplar-chosenia forest: 2nd tier – *Alnus fruticosa* Rupr.; all plants of the 3rd tier, except *Spirea salicifolia* L. and *Dasiphora fruticosa* L.; *d* – the lower reaches of the Enmyvaam River near the confluence of the Vap'anayvaam (Mukhomornaya) River. The poplar-chosenia forest with fallen poplars in the 1st tier; *e* – the chosenia-poplar forest: 1st tier – *Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. Skvorts. and *Populus suaveolens* Fisch. ex Poit. et A. Vilm.; 2nd tier – *Betula cajanderi* Sukaczew.; 3rd tier – thickets of *Ribes triste* Pall.; *f* – the chosenia-poplar forest with a predominance of *Populus suaveolens* Fisch. ex Poit. et A. Vilm.; 2nd tier – *Salix boganidensis* Trautv., *Alnus fruticosa* Rupr. and *Sorbus sibirica* (Hedl.) Krylov; 3rd tier – *Betula divaricata* Ledeb., *Ribes triste* Pall., *Rosa acicularis* Lindl., *Pinus pumila* (Pall.) Regel.

The near-edge floodplain forests feature unique young *Chosenia* trees towering up to 5 m and occasional willow, alder, rowan and other shrubs. The entire floodplain area is covered underwater during the spring and summer floods which last for 15 to 25 days. The central part of the floodplain with a thick layer of sand deposits is home to mature *Chosenia*-poplar forests, called “groves” in the Anadyr River basin. The species composition of woody plants in such groves is not very rich (about 50 species); they are typically dominated by 3 to 5 species characterized by a particularly active vegetative regeneration. Researchers of the Chukotka flora, botanists, geographers, taxonomists, and ecologists note that this feature is inherent in all *Chosenia* groves of the Anadyr River basin [6, 13, 14, 16–20, 39]. Therefore, the research we have undertaken is not only of a specific, but also of a general nature.

Our study has been aimed at investigating the structural features of the water-conducting tissue of woody flowering plants by tiers of the floodplain forest in the lower reaches of the Enmyvaam River and determining the ways of adaptation of the secondary xylem and its elements of the studied plants to an unstable (fluctuating) water schedule in the conditions of the hypoarctic tundra.

Research Objects and Methods

As a research material, in 2017, the samples of angiosperm wood have been collected in various areas of the lower reaches of the Enmyvaam River. Additionally, the samples from the dendrological collection of the Botanical Museum, Herbarium and the Laboratory of Far North Vegetation of the Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences have been used.

The samples of each species have been taken in triplicate: at breast height (1.3 m from the ground) for tall 1st-tier trees and at a height of 1/3 of the stem length from the ground for scrub trees. The samples of large shrubs have been selected from medium-sized branches at a distance of 2 cm from the root collar. Cross-sections of the wood of small shrubs and 3rd-tier dwarf shrubs have been taken just above the root collar; in the case of creeping forms, samples have been taken below the living crown, raised above the ground. The stem samples of small plants have not exceeded 1 cm in diameter. The sections of micro-preparations have been carried out on a freezing microtome from Reichert (Austria) in 3 projections: transverse (TrP), radial (RP), and tangential (TaP). Xylotomic descriptions and micrometry have been carried out using conventional methods [9, 23, 38] and the method of digital encoding of features, including 20 groups and 160 of their variations [32]. In our descriptions, we have adhered to the terminology proposed by the International Association of Wood Anatomists – IAWA [36] and the glossary in the Atlas of Wood and Paper Fibers [1]. The structural analysis of the hydraulic system has been carried out using an Axio Scope A1 Zeiss photon microscope and a Jeol JSM-6390 LA scanning electron microscope.

In the presented work, we have studied 17 species (Table 1) from 13 genera of 6 families of woody angiosperms.

The 1st tier comprises tall trees, up to 20 m high, including *Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. Skvorts. and fragrant poplar – *Populus suaveolens* Fisch. ex Poit. & A. Vilm.

The 2nd tier is formed by small trees and shrubs (from 2 to 12 m), including sharp-leaf willow (*Salix schwerinii* E.L. Wolf), Boganida willow (*Salix boganidensis* Trautv.), European green alder (*Alnus fruticosa* Rupr.) and Siberian rowan (*Sorbus*

sibirica Hedl.). A special focus is on the Cajander birch (*Betula cajanderi* Sukaczev.) (up to 14 meters high), which forms small groves in large clearings of the floodplain forest.

Table 1

The studied species of floodplain forests in the lower reaches of the Enmyvaam River

Genus (family)	Life form	High, m	Site
1st tier			
<i>Populus suaveolens</i> Fisch. (Salicaceae)	Tree	<20	Floodplain of the Vanakvaam (Sernaya) River
<i>Chosenia arbutifolia</i> (Pall.) A. Skvorts. (Salicaceae)			Floodplains of the Telerennetveem, Vanakvaam (Sernaya) and Vapanayvaam Rivers
2nd tier			
<i>Betula cajanderi</i> Sukacz. (Betulaceae)	Tree	<15	Floodplain of the Vapanayvaam (Sernaya) River, Mukhomornoye weather station
<i>Salix schwerinii</i> E. Wolf (Salicaceae)	Tree, shrub	<12	Floodplain of the Vapanayvaam (Sernaya) River, Ust-Belsky reindeer herding farm
<i>S. boganidensis</i> Trautv. (Salicaceae)	Shrub	<12	
<i>Alnus fruticosa</i> Rupr. (= <i>Duschekia fruticosa</i> (Rupr.) Pouzar) (Betulaceae)		<10	
<i>Sorbus sibirica</i> Hedl. (Rosaceae)	Tree, shrub	<10	Floodplain of the Varenon River
3rd tier			
<i>Betula divaricata</i> Ledeb. (= <i>B.middendorffii</i> Trautv. et C.A. Mey.) (Betulaceae)	Shrub	<1.5	Floodplain of the Vapanayvaam (Sernaya) River, Mukhomornoye weather station
<i>Potentilla fruticosa</i> L. (= <i>Pentaphylloides fruticosa</i> (L.) O. Schwarz) (Rosaceae)		<1.5	
<i>Spiraea salicifolia</i> L. (Rosaceae)		<1.5	
<i>Ledum decumbens</i> (Ait.) Lodd. ex Steud. (= <i>L. palustre</i> L. subsp. <i>decumbens</i> (Ait.) Hult.) (Ericaceae)		<0.4	
<i>Ribes triste</i> Pall. (Grossulariaceae)		<1	Floodplain of the Vapanayvaam (Sernaya) River, Ust-Belsky reindeer herding farm
<i>Rosa acicularis</i> Lindl. (Rosaceae)		<0.8	
<i>Betula exilis</i> Sukacz. (Betulaceae)	Dwarf shrub (creeping)	<0.4	Floodplain of the Varenon River
<i>Empetrum subholarcticum</i> V. Vassil. (Empetraceae)		<0.2	
<i>Vaccinium uliginosum</i> L. (Ericaceae)		<0.4	
<i>V. vitis-idaea</i> L. (Ericaceae)		<0.2	

The 3rd tier is occupied by scrub and dwarf shrubs (from 0.2 to 2 m high), including Middendorf's spreading birch (*Betula divaricata* Ledeb.), dwarf birch (*B. exilis* Sukaczew), shrubby cinquefoil (*Potentilla fruticosa* L.), willow-leaved meadowsweet (*Spiraea salicifolia* L.), swamp redcurrant (*Ribes triste* Pall.), prickly wild rose (*Rosa acicularis* Lindl.), wild rosemary (*Ledum decumbens* Small), bog bilberry (*Vaccinium uliginosum* L.), lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) and crowberry (*Empetrum subholarcticum* V.N. Vassil.).

This paper adopts the classification and size of families by A.L. Takhtadzhyan [30]. The names of taxa and authors have been verified according to IPNI [12], POWO [24], etc. [8, 25, 26].

Results and Discussion

The composition of wood of all the considered species is relatively uniform. In addition to the permanent elements, such as vascular segments, axial and radial parenchyma cells, it can comprise, for instance, only fibrous tracheids (pp. *Empetrum*, *Vaccinium*, *Ledum*) or only libriform fibers, often septate (pp. *Chosenia*, *Populus*, *Salix*). In the hydraulic system of small plants of the 2nd and especially, 3rd-tiers, tracheid-like vessels with 1 to 2 perforations on the lateral wall are sporadically encountered.

The wood of the species examined (Fig. 3–5) is typically scatter-vascular, occasionally combined with semi-ring-vascular (pp. *Empetrum*, *Ribes*, *Sorbus*, *Rosa*). Very narrow growth layers often have only one layer of vessels at the annual ring boundary in early wood. The vessel segments are extremely small, very small or fairly small in diameter – up to 25 μm , from 25 to 50 μm and from 50 to 100 μm , respectively [38]. In *Chosenia* and poplar species, the vessel segments are of short-cylindrical, cylindrical and fibrous shape, with the length exceeding the diameter by 2 to 7, 4 to 7 and 7 to 11 times, respectively, or, more often fibrous (p. *Betula cajan-deri*). In small shrubs, dwarf shrubs and prostrate shrubs of the *Betula*, *Ledum* and *Empetrum* genera, the vessel segments are mainly fibrous and elongate-fibrous, rarely cylindrical, with the length exceeding the diameter by 7 to 11, over 11 and 4 to 7 times, respectively. The vessel segment membranes are thin to moderately thickened and thickened (2.2, 3.2 and 4.0 μm) with rosettes from barely noticeable to medium (pp. *Chosenia*, *Populus*, *Betula*, *Salix*).

The most important water-conducting elements in the secondary xylem are various types of perforation plates and intervascular porosity. Thus, the perforations of the species considered are quite diverse: scalariform and, less frequently, scalariform-reticulate (pp. *Betula*, *Alnus*, *Ribes*, *Ledum*); solely simple (pp. *Chosenia*, *Populus*, *Salix*, *Potentilla*, *Spiraea*, *Rosa*); simple, occasionally combined with scalariform (pp. *Sorbus*). All types of plates from scalariform to simple are observed in *Vaccinium uliginosum* plants (Fig. 5). The intervascular porosity is equally diverse being represented by several types, both primitive (scalariform, transitional combined with opposite, as in representatives of the genera *Betula* and *Alnus*) and more specialized (mixed and alternate in various combinations, as in representatives of the genera *Spiraea* and *Ledum*). Representatives of the genera *Ribes*, *Vaccinium* and *Empetrum* demonstrate all the listed types of porosity. The species of the genus *Salix* are distinguished by alternate closed and close-set free porosity (Fig. 3).

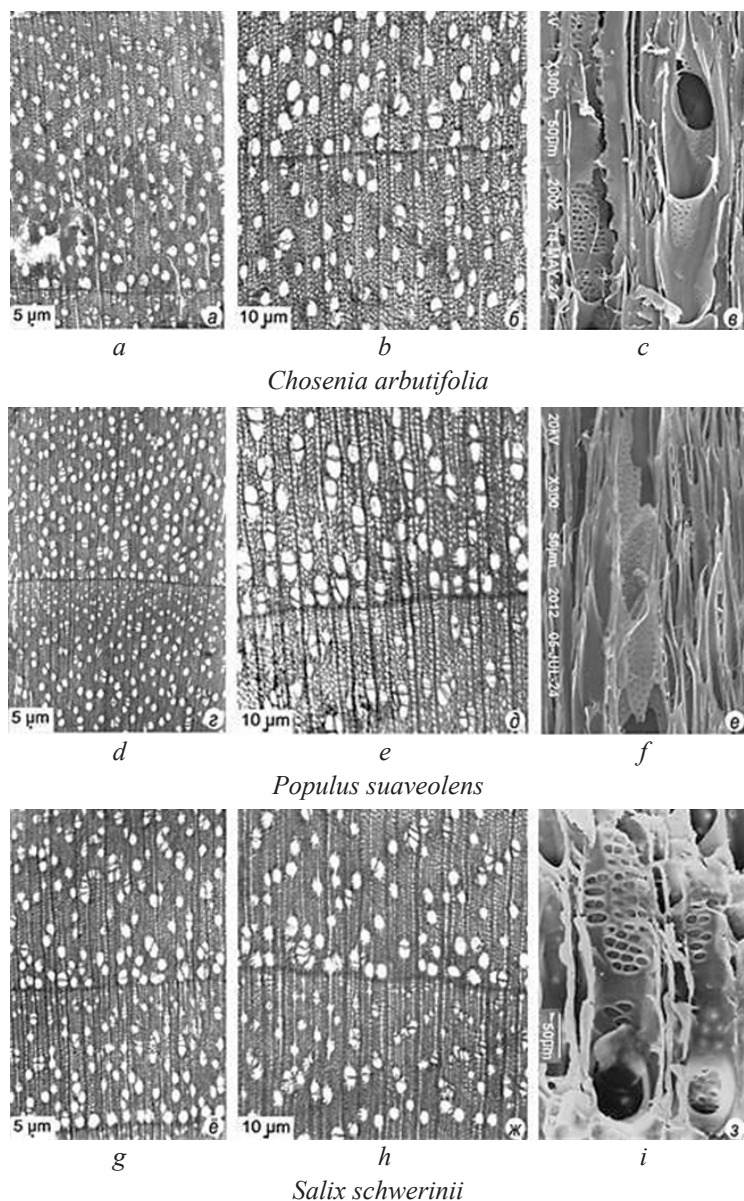


Fig. 3. The structural elements of the secondary xylem of woody plants (*Chosenia arbutifolia*, *Populus suaveolens*, *Salix schwerinii*): *a* – scattered-vascular type of wood, the even boundary of the annual ring is emphasized in the late wood by 1–3 cells flattened in the radial direction (TrP); *b* – scattered-vascular type of wood, the pores in the early part of the annual ring are slightly larger than in the late part (TrP); *c* – fragment of a vessel segment with simple perforations and alternate intervascular porosity (RP); *d* – scattered-vascular type of wood, with numerous pores, and a smooth boundary of the annual ring (TrP); *e* – scattered-vascular type of wood, with large pores often concentrated in the early wood near the boundary of the annual ring (TrP); *f* – vascular segments with simple perforations and alternate intervascular porosity (RP); *g* – scattered-vascular type of wood, the boundary of the annual ring is emphasized in the early wood by larger pores, and in the late wood by 2–3 libriform cells flattened in the radial direction (TrP); *h* – the boundary of the annual ring is slightly wavy, and the number of pores in the late wood is less than in the early wood (TrP); *i* – vessels with simple perforations and alternate close-set intervascular porosity (RP)

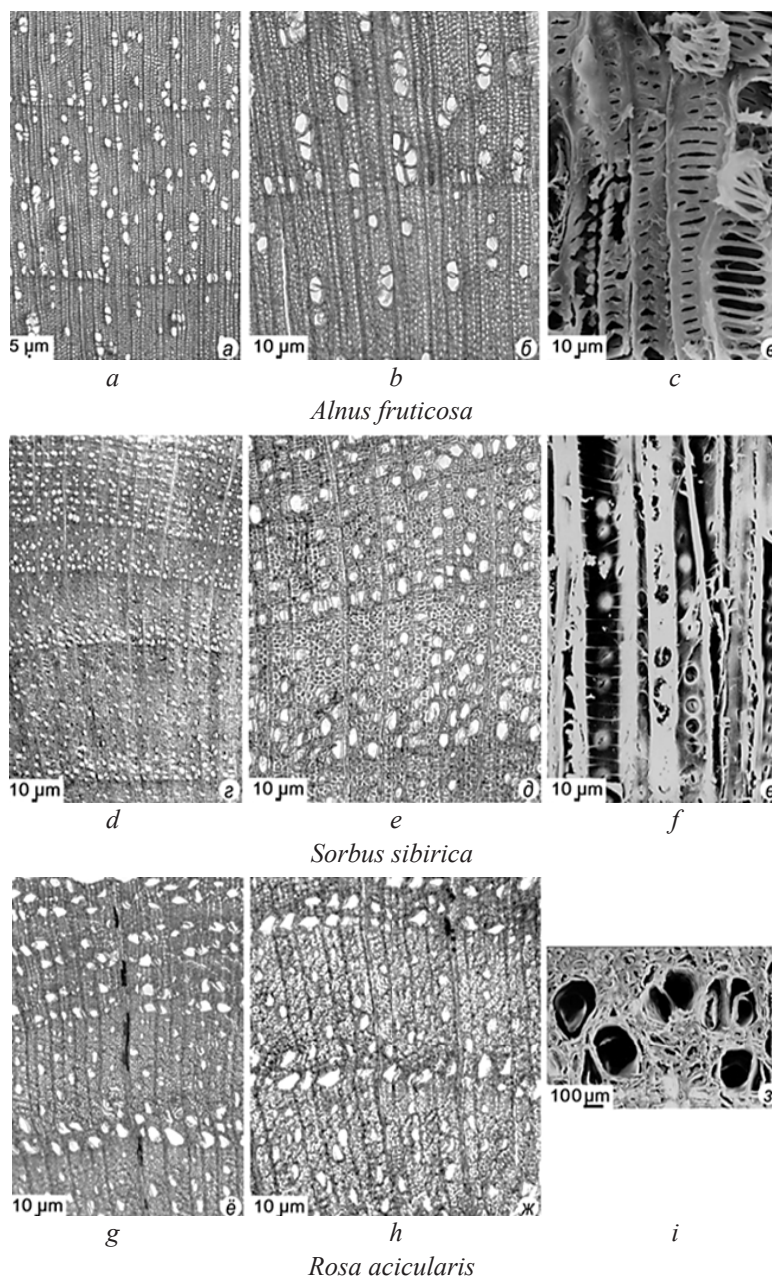


Fig. 4. The structural elements of the secondary xylem of woody plants (*Alnus fruticosa*, *Sorbus sibirica*, *Rosa acicularis*): *a* – scattered-vascular type of wood, with slightly wavy boundaries of annual rings (TrP); *b* – scattered-vascular type of wood, the pores are single or more often in groups (TrP); *c* – vessel segments with scalariform perforations (RP); *d* – scattered-vascular type of wood with a tendency to semi-ring-vascularity, with narrow growth layers, slightly wavy boundaries, and narrow pores (TrP); *e* – scattered-vascular type of wood with a tendency to semi-ring-vascularity, with larger pores located along the boundary of the annual ring (TrP); *f* – fragment of fibrous and vascular tracheid with rounded and oval bordered pores (TaP); *g* – wood with a tendency towards the ring-vascular type, the boundaries of the annual rings are emphasized by 1–3 tracheal elements flattened in the radial direction (TrP); *h* – boundaries of the annual ring are emphasized in the early wood by 1 or 2 layers of larger pores (TrP); *i* – pores are single and paired (TrP)

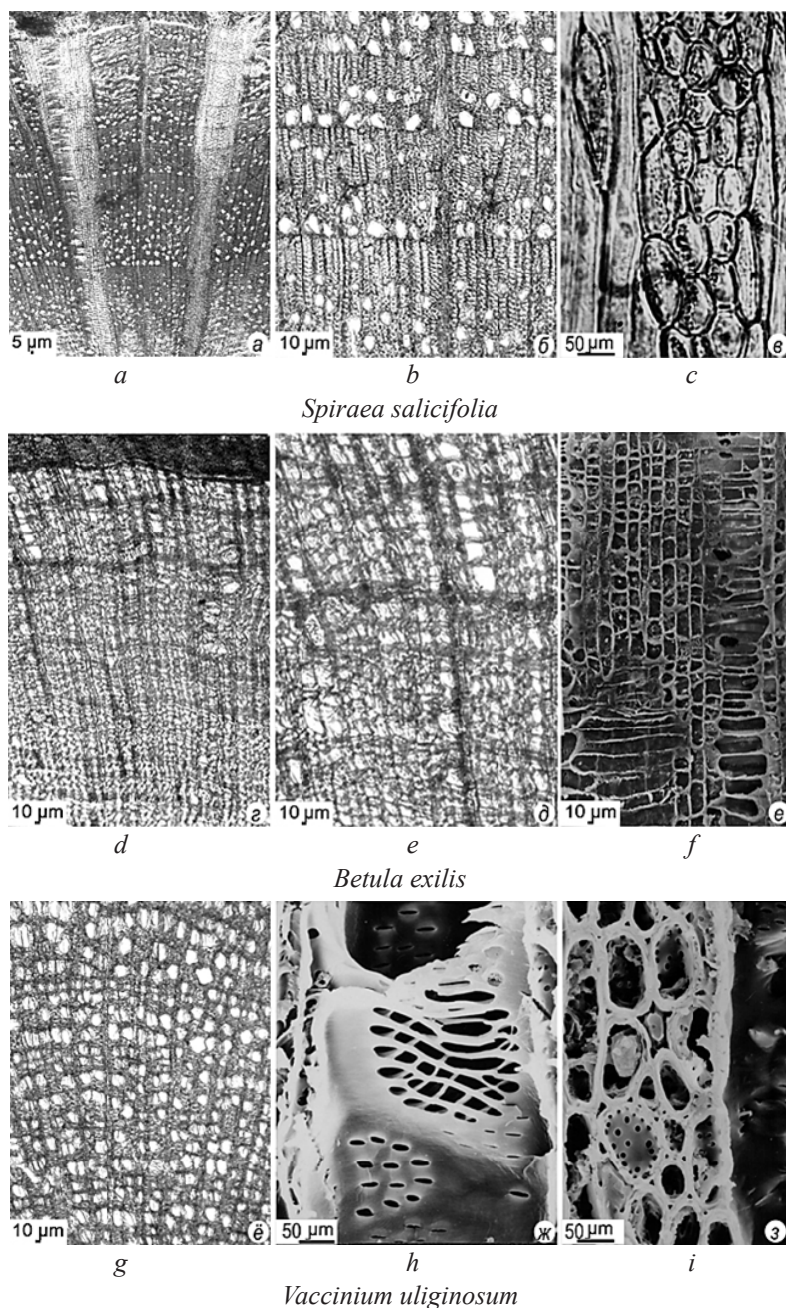


Fig. 5. The structural elements of the secondary xylem of woody plants (*Spiraea salicifolia*, *Betula exilis*, *Vaccinium uliginosum*): *a* – scattered-vascular type of wood with wide multi-row rays and small pores (TrP); *b* – scattered-vascular wood with a tendency to ring-vascularity, the boundary of annual rings is emphasized in the early wood by 1–12 elements flattened in the radial direction (TrP); *c* – fragment of a 4-row ray (TaP); *d* – wood with 9 annual rings and wavy boundaries, emphasized by 1–3 fibrous elements flattened in the radial direction (TrP); *e* – scattered-vascular type of wood, with single and grouped pores, or the ones in radial chains of 3 to 6 (TrP); *f* – fragment of a heterogeneous ray (TaP); *g* – scattered-vascular type of wood with unclear annual ring boundaries and false annual rings (TrP); *h* – fragment of a vessel segment with reticulate perforation and alternate intervacular porosity (RP); *i* – fragment of a 4–5-row ray (TaP)

Fibrous tracheids, from moderately thickened to fairly thick (3.5 to 4.5 μm), occupy the largest volume in wood. On their radial walls there are bordered pores of oval and oval-elongated shapes with the apertures repeating their outlines. Libriform, or simple-pore fibers, have thicknesses ranging from 2.8 to 4.5 μm . Thinner membranes are observed in those life forms that include shrubs, dwarf shrubs and prostrate shrubs while thickened membranes are in the plant life-forms that include trees, small trees and tall shrubs, more specifically, *Chosenia*, *Populus*, *Betula cajanderi*, *Alnus*, etc. In addition, some species have vascular tracheids in the water-conducting tissue – non-perforated cells with signs of a mechanical fiber and a vessel segment, similar to it in shape and porosity type – *Betula*, *Spiraea*. The axial parenchyma is most often sparse, apotracheal, either diffuse or chain-like, with several cells in short chains scattered randomly among fibrous elements (pp. *Salix*, *Ledum*, *Spiraea*, *Potentilla*, *Rosa*) or relatively abundant (pp. *Alnus*, *Betula*, *Vaccinium*, *Empetrum*). Representatives of the genera *Spiraea*, *Ribes*, *Potentilla*, *Rosa*, *Salix* and *Betula* have, in addition to the apotracheal, sparse paratracheal vasicetric parenchyma.

The overwhelming majority of the species considered are characterized by heterogeneous rays. However, some of the examined plants of the genera *Chosenia*, *Populus*, *Salix* and *Sorbus* have heterogeneous rays with a tendency to homogeneous ones and even homogeneous rays. Representatives of the genera *Rosa*, *Vaccinium*, *Empetrum*, *Alnus*, *Betula*, *Ledum*, *Potentilla*, *Spiraea* and *Ribes* sometimes exhibit heterogeneous rays in combination with homogeneous palisade rays. The ray width (number of rows) in the studied species is quite diverse: from single-row in *Chosenia*, *Populus*, *Salix* and *Empetrum*, single-row and partially double-row in *Ledum* and *Potentilla* to single-row, double-row and multi-row in *Ribes*, *Vaccinium*, *Betula*, *Spiraea* and *Rosa*.

The ray height (number of layers) shows considerable instability. A low layering index is observed in *Betula* and *Empetrum*, up to 10–12 cells, while in *Ribes*, *Vaccinium* and *Salix* it is higher – 30–35 cells. Frequently, narrow, low rays, merging at their ends, significantly increase the height. 2 and 3-row rays often demonstrate short, single-row endings in *Ribes*, *Vaccinium* etc. However, this feature is fairly unstable and is rarely used in definitions.

Analyzing the quantitative indicators of the hydraulic system of woody plants from layer to layer, it should be noted, that as the habitat conditions deteriorate and the growth energy (habitus) decreases, the average values of xylotomic characteristics change: the width of the annual rings and the diameter of pores decrease, while the density of the vessels, in contrast, increases. This quantitative redistribution of traits is a non-specific response of the water-conducting tissue to any deterioration in conditions and serves as an important factor in the struggle of plants for existence [4, 5, 27, 31, 33]. In larger 1st and 2nd-tier plants of the genera *Chosenia*, *Populus*, *Salix*, *Betula* and *Sorbus*, the xylotomic indices of the secondary xylem are slightly higher (Table 2) than in representatives of small habits of the genera *Spiraea*, *Ledum*, *Rosa* etc. [7, 15].

Comparative xylotomic studies of the hypoarctic tundra floodplain forest species should preferably be carried out taking into account the plant life form, age and habitat conditions. It is important to bear in mind that the environmental effect on the plant is but a whole combination of soil and climatic factors that impact the plant's external and internal structure in its entirety rather than only individual structural features [35].

Table 2

The quantitative xylotomic indices of the species considered

Species	Annual ring width, mm	Quantity of vessels, pcs/mm ²	Tangential pore size, μm	Length, μm		Number of rays, pcs/mm
				vessel segment	fibrous element	
1st tier						
<i>Chosenia arbutifolia</i>	<u>1.3</u> 32.7	<u>93</u> 14.3	<u>46.6</u> 31.7	<u>420</u> 29.3	<u>755</u> 20.1	<u>12</u> 23.9
<i>Populus suaveolens</i>	<u>1.5</u> 34.1	<u>130</u> 22.2	<u>70.0</u> 33.0	<u>412</u> 26.1	<u>942</u> 21.8	<u>19</u> 27.3
2nd tier						
<i>Betula cajanderi</i>	<u>1.0</u> 21.9	<u>40</u> 11.2	<u>45.0</u> 29.4	<u>910</u> 31.4	<u>1,000</u> 26.1	<u>14</u> 19.8
<i>Salix schwerinii</i>	<u>0.8</u> 23.7	<u>280</u> 29.6	<u>27.5</u> 25.2	<u>500</u> 25.5	<u>680</u> 22.1	<u>8</u> 14.2
<i>S. boganidensis</i>	<u>0.7</u> 29.3	<u>550</u> 34.2	<u>25.0</u> 26.1	<u>575</u> 21.8	<u>650</u> 21.8	<u>9</u> 13.8
<i>Alnus fruticosa</i>	<u>1.4</u> 32.5	<u>183</u> 23.1	<u>50.0</u> 30.0	<u>559</u> 23.7	<u>683</u> 19.7	<u>19</u> 22.3
<i>Sorbus sibirica</i>	<u>1.2</u> 31.7	<u>150</u> 24.1	<u>38.7</u> 19.7	<u>450</u> 21.4	<u>1,200</u> 25.4	<u>18</u> 20.9
3rd tier						
<i>Betula divaricata</i>	<u>0.2</u> 17.5	<u>161</u> 15.3	<u>24.6</u> 20.7	<u>370</u> 12.1	<u>486</u> 16.3	<u>17</u> 13.9
<i>Potentilla fruticosa</i>	<u>0.1</u> 15.4	<u>147</u> 18.3	<u>32.2</u> 21.0	<u>232</u> 18.5	<u>413</u> 16.6	<u>21</u> 12.8
<i>Spirea salicifolia</i>	<u>0.23</u> 22.0	<u>687</u> 16.9	<u>24.5</u> 30.0	<u>158</u> 21.1	<u>259</u> 10.6	<u>22</u> 13.0
<i>Ribes triste</i>	<u>0.3</u> 21.1	<u>640</u> 21.4	<u>21.1</u> 34.2	<u>134</u> 35.1	<u>196</u> 13.8	<u>28</u> 27.8
<i>Rosa acicularis</i>	<u>0.3</u> 22.2	<u>381</u> 12.0	<u>34.0</u> 20.0	<u>230</u> 14.4	<u>342</u> 15.2	<u>23</u> 10.1
<i>Betula exilis</i>	<u>0.2</u> 30.2	<u>147</u> 16.6	<u>27.9</u> 26.9	<u>179</u> 23.5	<u>361</u> 14.4	<u>17</u> 11.4
<i>Ledum decumbens</i>	<u>0.07</u> 26.6	<u>857</u> 11.3	<u>21.0</u> 19.9	<u>218</u> 13.1	<u>320</u> 11.7	<u>26</u> 11.2
<i>Empetrum subholarcticum</i>	<u>0.2</u> 17.6	<u>548</u> 12.9	<u>22.8</u> 26.7	<u>184</u> 17.9	<u>239</u> 11.5	<u>23</u> 16.6
<i>Vaccinium uliginosum</i>	<u>0.1</u> 35.4	<u>869</u> 12.5	<u>22.7</u> 18.9	<u>130</u> 12.5	<u>196</u> 13.7	<u>26</u> 11.5
<i>V. vitis-idaea</i>	<u>0.1</u> 35.4	<u>850</u> 14.2	<u>22.0</u> 24.7	<u>125</u> 19.4	<u>191</u> 11.7	<u>26</u> 17.2

Note: The denominator indicates the magnitude of the index variability, %.

The examined anatomical features of the secondary xylem of woody species from different tiers of the floodplain forest in the vicinity of the Enmyvaam River have shown that the water-conducting system of the 1st-tier trees is the most sophisticated of all. It consists only of libriform fibers and vessel segments of a short-cylindrical, cylindrical and fibrous shape with simple perforations, punctate alternate, closed and close-set porosity, with single-row mainly homogeneous rays, apotracheal and para-

tracheal parenchyma. The perfection of the hydraulic system of 1st-tier plants is most likely associated with a more intense water exchange regime in tall trees, whose crowns are more exposed to the harsh environmental influences of the Far North, that is, insolation, wind, temperature and humidity [10, 34].

The 2nd-tier shrub and scrub tree wood demonstrate the occurrence of both archaic and evolutionarily advanced features in almost equal proportions. In *Alnus* and *Sorbus* species, for example, it's a combination of libriforms with fibrous and vascular tracheids; vessel segments with scalariform, reticulate and simple perforations, apotracheal and paratracheal parenchyma, heterogeneous and homogeneous palisade rays. As for the species of the genus *Salix*, they have a very sophisticated hydraulic system, just like the 1st-tier plants. Both belong to the same *Salicaceae* family.

The 3rd-tier small and dwarf shrubs, occupying the sites with excessive absolute and relative humidity and sometimes extremely weak lighting, demonstrate the widest range of specific adaptive features acquired through the adaptation to the extreme conditions of high latitudes [2, 6]. It has been noted that in the plants of 2 lower tiers, with the exception of representatives of the genus *Salix*, there is no clear division into water-conducting, mechanical and storage elements since the fibrous tracheids present in it partially take over these functions [3, 11, 22, 28, 29, 37].

As a phylogenetic group of woody plants, the genus *Salix* has been formed in the dynamic conditions of river floodplains where plants have developed a special set of adaptive traits called «ecological dualism», enabling them to successfully grow in an environment with an unstable water regime, from flooding in a low floodplain to summer drought in a high floodplain [21].

It has been discovered that the overwhelming majority of plants of the hypoarctic tundra floodplain forests, irrespective of the tier, demonstrate a primitive, scattered-vascular type of wood that does not require a long growing season or significant energy expenditure for its formation [22]. However, this indicates the physiological necessity of such a feature rather than the specialization level of the taxa in question.

Importantly, the study has revealed the simultaneous presence of traits of varying specialization degrees (heterobathmy) in the wood of all the studied species of the Enmyvaam River floodplain forest which increase their genetic flexibility and adaptive abilities to occupy various ecological niches in the Far North pessimal conditions.

Conclusion

Thus, the study of the structural features of the secondary xylem in woody flowering plants through the adaptation to the floodplain forest conditions of the Enmyvaam River (hypoarctic tundra) allows to reveal, using the example of model genera and species, certain patterns in the formation of the water-conducting system and adaptive strategies of multi-tiered forest phytocenoses of a number of tributaries of the Anadyr River basin (Chukotka).

REFERENCES

1. *Atlas of Wood and Paper Fibers*. Ed. by E.S. Chavchavadze. Moscow, Klyuch Publ., 1992. 336 p. (In Russ.).

2. Benkova V.E., Schweingruber F.H. *Anatomy of Woody Plants in Russia*. Bern, Stuttgart, Vienna, Paul Haupt Publ., 2004. 456 p. (In Russ.).
3. Carlquist S. *Ecological Strategies of Xylem Evolution*. Berkley, 1975. 260 p.
4. Carlquist S. Further Concepts in Ecological Wood Anatomy, with Comments on Recent Work in Wood Anatomy and Evolution. *Aliso: A Journal of Systematic and Floristic Botany*, 1980, vol. 9, iss. 4, pp. 499–553.
5. Chavchavadze E.S., Umarov M.U., Sizonenko O.Yu. Anatomical and Physiological Characteristics of Wood of Some Species of the Genus *Zhoster* (*Rhamnus* L.) from Mountainous Habitats. *Sovremennye problemy anatomii rastenij*: Materials of the International Conference. Brest, 1996, p. 49. (In Russ.).
6. Chavchavadze E.S., Sizonenko O.Yu. *Structural Features of the Wood of Shrubs and Dwarf Shrubs of the Arctic Flora of Russia*. Ed.-in-Chief V.M. Eremin. St. Petersburg, Rostok Publ., 2002. 272 p. (In Russ.).
7. Chavchavadze E.S., Sizonenko O.Yu., Volkova S.B. Ways of Adaptation the Secondary Xylem of Woody Plants to the Extreme Environment of the Arctic Region. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya i ekologiya* = Vestnik Tver State University. Series: Biology and Ecology, 2012, vol. 27, no. 23, pp. 67–73. (In Russ.).
8. Cherepanov S.K. *Vascular Plants of Russia and Adjacent Countries (within the Former USSR)*. St. Petersburg, Mir i Sem'ya Publ., 1995. 992 p. (In Russ.).
9. Glotov N.V., Zhivotovskij L.A., Khovanov N.V., Khromov-Borisov N.N. *Biometrics*. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1982. 263 p. (In Russ.).
10. Greguss P. *Holzanatomie der Europäischen Laubholzer und Straucher*. Budapest, 1959. 332 p. (In Germ.).
11. Grosser D. *Die Holzer Mitteleuropas*. Berlin, 1977. 208 p. (In Germ.).
12. IPNI (2025). *International Plant Names Index*. Available at: <https://www.ipni.org/> (accessed 13.03.24).
13. Kachalov A.A. *Trees and Shrubs*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 407 p. (In Russ.).
14. Katenin A.E., Petrovsky V.V. Local Flora of the Northern Part of the Chukotka Peninsula. *Botanicheskij zhurnal* = Botanical Journal, 2013, vol. 98, no. 3, pp. 281–305. (In Russ.).
15. Khokhryakov A.P., Mazurenko M.T. Biomorphological Adaptations of Woody Plants to Arctic Conditions. *All-Union Conference on the Adaptation of Woody Plants to Extreme Environmental Conditions*. Petrozavodsk, 1981, pp. 79–80. (In Russ.).
16. Korobkov A.A., Sekretareva N.A. Botanical and Geographical Observations in the Lower Reaches of the Enmyvaam River (Anadyr River Basin). *Botanicheskij zhurnal* = Botanical Journal, 1986, vol. 71, no. 4, pp. 450–459. (In Russ.).
17. Korobkov A.A., Sekretareva N.A., Zhelezov N.K. On the Flora of the Lower and Middle Reaches of the Enmyvaam River (Belaya River Basin). *Ekologiya, rasprostraneniye i zhiznennye formy rastenij Magadanskoj oblasti*. Vladivostok, Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences, 1987, pp. 15–30. (In Russ.).
18. Korobkov A.A., Sekretareva N.A. Analysis of the Flora of “Southern Chukotka” (Nizhneanadyrsky District). *Krylovia*, 2001, vol. 3, no. 2, pp. 63–77. (In Russ.).
19. Korobkov A.A., Sekretareva N.A. Taxonomical and Geographical Structure of Flora in the Anadyr River Basin, Chukotskii Autonomous Region. *Byulleten' Botanicheskogo sada Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk*, 2007, iss. 1, pp. 50–71. (In Russ.).
20. Kozhevnikov Yu.P. Down the Main and Anadyr from Vaega to Ust-Belaya (Chukotka National District). *Botanicheskij zhurnal* = Botanical Journal, 1977, vol. 62, no. 4, pp. 597–610. (In Russ.).
21. Kulagin A.Yu. *Ecological and Biological Features of Willows and Technogenesis*. Ufa, Bashkir Scientific Center of the Ural Branch of the USSR Academy of Sciences, 1990. 19 p. (In Russ.).
22. Lobzhanidze E.D., Gabuniya M.D. *Ecology of Cambium Activity and Wood Formation*. Tbilisi, 2008. 513 p. (In Russ.).

23. Metcalfe C.R., Chalk L. *Anatomy of the Dicotyledons. Volume II: Wood Structure and Conclusion of the General Introduction*. Oxford, 1983. 297 p.
24. POWO (2025). *Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew*. Available at: <https://powo.science.kew.org/> (accessed 13.03.24).
25. Sekretareva N.A. *The Vascular Plants of the Russian Arctic and Adjacent Territories*. Sofia, Moscow, Pensoft Publ., 1999. 160 p.
26. Sekretareva N.A. *The Vascular Plants of the Russian Arctic and Adjacent Territories*. Moscow, KMK Publ. House, 2004. 131 p. (In Russ.).
27. Sizonenko O.Yu. *A Comparative Anatomical Study of the Secondary Xylem of Shrubs and Dwarf Shrubs of the Arctic Flora of Russia*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. St. Petersburg, 2000. 14 p. (In Russ.).
28. Sizonenko O.Yu., Chavchavadze E.S. Anatomy of the Secondary Xylem of Representatives of the Genus *Salix* (Salicaceae) from the Northern Regions of Russia. *Botanicheskij zhurnal* = Botanical Journal, 2002, vol. 87, no. 6, pp. 67–77. (In Russ.).
29. Sizonenko O.Yu., Chavchavadze E.S. Anatomical Features of the Secondary Xylem of Representatives of the Genera *Betula* and *Duschekia* (Betulaceae) in the Far North of Russia. *Botanicheskij zhurnal* = Botanical Journal, 2006, vol. 91, no. 12, pp. 1868–1875. (In Russ.).
30. Takhtadzhyan A.L. *Magnoliophyte System*. Leningrad, Nauka Publ., 1987. 439 p. (In Russ.).
31. Umarov M.U., Chavchavadze E.S. Structural Changes in the Wood of *Periploca graeca* (Asclepiadaceae) in Relation to Habitat Conditions. *Botanicheskij zhurnal* = Botanical Journal, 1990, vol. 75, no. 5, pp. 675–682. (In Russ.).
32. Umarov M.U., Chavchavadze E.S., Volkova S.B. On Formation of the Information Data Base on Wood Structure of Angiosperms. *Gornye ekosistemy i ikh komponenty*: Proceedings of the International Conference. Moscow, KMK Publ. House, 2007, pp. 143–147. (In Russ.).
33. Umarov M.U., Chavchavadze E.S., Shchekalev R.V., Romanova V.O., Umarov R.M. Variability of Anatomical Characteristics of the Wood of Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the Conditions of the North Caucasus. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 78–89.
34. Umarov M.U., Chavchavadze E.S., Umarov R.M. Analysis of the Hydraulic System of Woody Plants of Various Tiers of Floodplain Forest. *Groznenskiy estestvennonauchnyy byulleten'* = Grozny Natural Science Bulletin, 2024, vol. 9, no. 1(35), pp. 105–110. (In Russ.).
35. Vasil'ev B.R. *The Structure of the Leaves of Woody Plants in Different Climatic Zones*. Leningrad State University Publ., 1988. 206 p. (In Russ.).
36. Wheeler E.A., Baas P. Wood Identification – A Review. *IAWA Journal*, 1998, vol. 19, iss. 3, pp. 241–264. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001528>
37. Yatsenko-Khmelevskij A.A. Principles of Wood Inventory. *Trudy Botanicheskogo institututa Akademii nauk Armyanskoy SSR*, 1948, vol. 5, pp. 33–58. (In Russ.).
38. Yatsenko-Khmelevskij A.A. *Fundamentals and Methods of Anatomical Examination of Wood*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1954. 337 p. (In Russ.).
39. Yurtsev B.A., Sekretareva N.A. The Tnekveemskaya Chosenia Grove in the North of the Lower Anadyr Lowland. *Ekologo-tsenoticheskie i geograficheskie osobennosti rastitel'nosti*. Moscow, Nauka Publ., 1983, pp. 232–248. (In Russ.).

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 631.811:581.131:662.632:676.031.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-48-59


Сравнительные эколого-физиологические характеристики реакции семенных древостоев дуба (*Quercus robur* L.) на лесорастительные условия

В.М. Лебедев, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID:* [M-8699-2019](https://orcid.org/0000-0003-3316-854X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>

Е.В. Лебедев , *д-р с.-х. наук, доц.;* *ResearcherID:* [G-9445-2019](https://orcid.org/0000-0002-5824-6981),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>

Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru 

Поступила в редакцию 11.07.24 / Одобрена после рецензирования 27.09.24 / Принята к печати 01.10.24

Аннотация. Проведен комплексный ретроспективный эколого-физиологический анализ табличных данных сухой массы древостоев рода *Quercus* возрастом от 10–20 до 140–200 лет с целью преобразования их в количественные показатели функционирования корневой системы, листового аппарата, чистой первичной продуктивности и депонирования углерода, адаптированные к экологическим условиям от широколиственных лесов Германии до юго-восточных пределов Русской равнины. Эколого-физиологические характеристики рассчитаны на 1 условное дерево сухой средней массы. Биологическая продуктивность определена по относительному увеличению средней сухой массы дерева в смежных возрастах. Количественные показатели минеральной продуктивности корневой системы установлены по методу В.М. Лебедева (адаптированному Е.В. Лебедевым к лесным древесным растениям), чистой продуктивности фотосинтеза – по А.А. Ничипоровичу. Выявлена отрицательная связь чистой продуктивности фотосинтеза, чистой первичной продукции и биологической продуктивности с возрастом растений и положительная – минеральной продуктивности с чистой продуктивностью фотосинтеза и биологической продуктивностью ($r = 0,863...0,998$ и $0,797...0,991$). Связь отношения корневого потенциала к фотосинтетическому и возраста растения оказалась высокой положительной ($r = 0,863...0,980$), а связь отношения корневого потенциала к фотосинтетическому с минеральной продуктивностью, чистой продуктивностью и биологической продуктивностью – высокой отрицательной. Связь минеральной продуктивности с возрастом растений отрицательна. Снижение поглотительной деятельности корней активизировало неспецифическую адаптивную реакцию, затрагивающую физиологические, функциональные и морфологические процессы, усиливающие подачу в надземные органы продуктов минерального питания, обеспечивающих фотосинтез и стабилизацию биологической продуктивности растения, а также в этих условиях показан перевод обменных процессов на уровне организма в онтогенезе на режим более эффективного использования азота при формировании биомассы для сохранения гомеостатического равновесия в биологической системе.

Ключевые слова: *Quercus*, минеральное питание, фотосинтез, чистая первичная продукция, депонирование углерода, уровень организма, онтогенез, европейский ареал дуба

Для цитирования: Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Сравнительные эколого-физиологические характеристики реакции семенных древостоев дуба (*Quercus robur* L.) на лесораскательные условия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 48–59.
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-48-59>

Original article

Comparative Ecological and Physiological Characteristics of the Response of Oak (*Quercus robur* L.) Seed Stands to Forest Growth Conditions

Valentin M. Lebedev, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8699-2019](https://orcid.org/0000-0003-3316-854X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>

Evgeny V. Lebedev✉, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-9445-2019](https://orcid.org/0000-0002-5824-6981),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>

Nizhny Novgorod State Florentyev Agrotechnological University, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru✉

Received on July 11, 2024 / Approved after reviewing on September 27, 2024 / Accepted on October 1, 2024

Abstract. A comprehensive retrospective ecological and physiological analysis of tabular data on the dry mass of stands of the genus *Quercus* aged from 10–20 to 140–200 years has been carried out in order to convert them into quantitative indices of the functioning of the root system, leaf apparatus, net primary productivity and carbon sequestration adapted to environmental conditions from the broad-leaved forests of Germany to the southeastern reaches of the Russian Plain. Ecological and physiological characteristics have been calculated for 1 conventional tree of average dry weight. Biological productivity has been determined by the relative increase in the average dry weight of a tree in adjacent ages. Quantitative indices of mineral productivity of the root system have been established using the method by V.M. Lebedev (adapted by E.V. Lebedev to forest woody plants), and net photosynthetic productivity has been established using the method by A.A. Nichiporovich. A negative relationship has been revealed between the net photosynthetic productivity, net primary production, biological productivity and plant age, and a positive one between mineral productivity, net photosynthetic productivity and biological productivity ($r = 0.863 \dots 0.998$ and $0.797 \dots 0.991$). The relationship between the ratio of root potential to photosynthetic potential and plant age has turned out to be highly positive ($r = 0.863 \dots 0.980$), while the relationship between the ratio of root potential to the photosynthetic potential and mineral productivity, net productivity and biological productivity has been highly negative. The relationship between mineral productivity and plant age has been negative. A decrease in the absorption activity of the roots has activated a non-specific adaptive response affecting physiological, functional and morphological processes that enhance the supply of mineral nutrients to the aboveground organs, ensuring photosynthesis and stabilizing the biological productivity of the plant. Under these conditions, a transfer of metabolic processes at the organism level during the ontogeny to a mode of more efficient use of nitrogen during the formation of biomass to maintain homeostatic equilibrium in the biological system has been demonstrated.

Keywords: *Quercus*, mineral nutrition, photosynthesis, net primary production, carbon sequestration, organism level, ontogeny, the European range of oak

For citation: Lebedev V.M., Lebedev E.V. Comparative Ecological and Physiological Characteristics of the Response of Oak (*Quercus robur* L.) Seed Stands to Forest Growth Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 48–59. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-48-59>

Введение

Род *Quercus* входит в число лесообразующих для умеренных широт северного полушария [8]. Биологические особенности вида изучались в основном таксационно-физиологическими методами [3, 7–9, 11, 15–19, 21–23], затрагивалась преимущественно надземная часть растения, и лишь некоторые исследователи [5, 6, 10, 20] уделяли внимание корневой системе. Функционирование биологических процессов и их взаимосвязь у семенных древостоев на уровне организма практически не рассмотрены учеными, что лимитирует возможности управления продуктивностью таких древостоев. Для повышения результативности модельных и прогностических оценок продуктивности лесных фитоценозов необходимы количественные показатели функционирования листового аппарата и корневой системы для каждого лесообразующего вида в разных климатических зонах [12–14, 16, 20]. Существующие методы изучения биологической продуктивности лесных фитоценозов не позволяют выходить на уровень организма вследствие крайней сложности решаемой задачи. На основе таблиц хода роста (ТХР) древостоев и последующих разработок В.А. Усольцева, совместивших ТХР с данными о фитомассах древостоев Евразии [12–14], появилась возможность предложить ретроспективный комплексный эколого-физиологический метод [6] конвертации информации о фитомассах в показатели работы корневой системы, листового аппарата и биологической продуктивности на уровне организма в онтогенезе в конкретных экологических условиях.

Цель работы – получить на уровне организма количественные показатели 1) работы корневой системы и листового аппарата семенных насаждений дуба черешчатого (*Quercus robur* L.); 2) характера их взаимосвязи; 3) чистой первичной продукции; 4) депонирования углерода в различные возрастные периоды и 5) зон с повышенной продуктивностью на территории от Германии до юго-востока Русской равнины.

Объекты и методы исследования

Для получения сведений о сухой массе 1 растения (организма) табличные данные, приведенные В.А. Усольцевым [12] для 1 га, пересчитывали на 1 дерево средней массы – листья, сучья, стволы и корни. За длительность вегетации в регионах принят природный безморозный период, исключающий снижение активности фотосинтетического аппарата [2]. Чистую продуктивность фотосинтеза и фотосинтетический потенциал (ФП) определяли по методике А.А. Ничипоровича с учетом морфометрии и веса листьев дуба [1, 11]. Расчет активной поверхности корневой системы, корневого потенциала (КП) и установление минеральной продуктивности (МП) выполняли по методике И.А. Мухомцева [10] с использованием собственных наработок [4, 5].

Депонирование углерода (ДУ) определяли по [4], биологическую продуктивность (БП, относительное увеличение первоначальной сухой фитомассы растения) – по [6]. Листовой (ЛИ) и корневой индексы (КИ) находили как част-

ное от деления площади листьев и активной поверхности корневой системы целого растения на площадь его питания. Чистую первичную продукцию (ЧПП) устанавливали как произведение чистой продуктивности фотосинтеза (ЧПФ, г/м²·день), числа безморозных дней в году и ЛП (г/м² площади питания в год). Чистую минеральную продуктивность по азоту (ЧМП(Н)) вычисляли как произведение МП элемента (мг/м²·сут.), продолжительности безморозного периода и КИ (г/м² площади питания в год).

Характеристика объекта исследования – семенных древостоев дуба черешчатого *Quercus robur* L. – представлена в табл. 1.

Таблица 1

Условия произрастания семенных древостоев дуба
The growing conditions of oak seed stands

Регион	Условия произрастания	Возраст, лет	Количество растений, экз./га	Безморозный период, дни	Тип почвы	Климат
Германия	Широколиственные леса	20–160	72–4820	150	Бурая лесная	Переходный от морского к континентальному
Литва	Смешенные леса	10–150	101–12 158	140	Дерново-подзолистая	Умеренно континентальный
Белоруссия		20–180	480–4900	140		
Украина	Лесостепь	20–160	137–3070	140	Серая лесная	Умеренный переходный к континентальному
Центральная Россия	Хвойно-широколиственные леса	20–200	142–4522	130	Дерново-подзолистая	Континентальный
Чувашия	Смешенные леса	10–160	124–16 124	130	Серая лесная	Умеренно континентальный
Башкирия	Леса предгорий Южного Урала	10–150	282–8913	120	Дерново-подзолистая	Континентальный
Северный Кавказ	Широколиственные леса	20–140	202–5169	140	Черноземная	Умеренно континентальный

Примечание: Класс бонитета – I.

Полученные результаты обрабатывали корреляционным и регрессионным методами анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что у растений дуба 10–20...140–200 лет связи ЧПФ, БП и ЧПП с возрастом во всех регионах отрицательны ($r = -0,875...-0,943$; $-0,645...-0,873$; $-0,907...-0,983$ соответственно) и снизились в 2,8–12,9; 2,6–6,4 и 2,5–10,8 раза соответственно. Во всех регионах связь МП с возрастом растений была отрицательной ($r = -0,847...-0,965$; $-0,808...-0,935$; $-0,817...-0,926$), а поглощение азота снизилось в 4,8–18,6 раза, фосфора – в 5,3–21,1 раза, а калия – в 4,9–16,0 раз (рис. 1). Характер взаимосвязи физиологических процессов в онтогенезе приведен в одном масштабе, % от максимума (рис. 2).

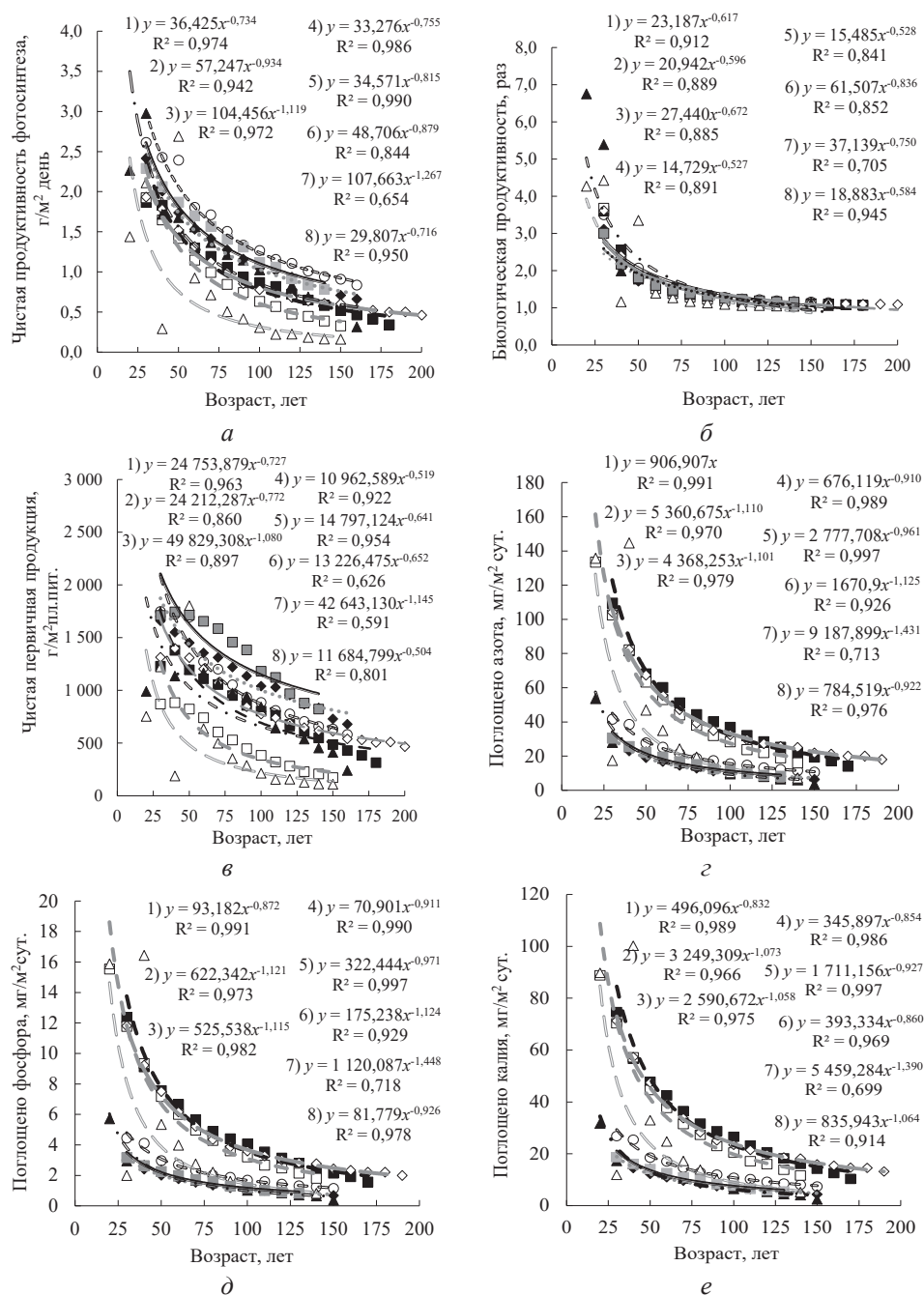


Рис. 1. Чистая продуктивность фотосинтеза (а), биологическая продуктивность (б), чистая первичная продукция (в) и поглощение N (г), P (д), K (е) растениями дуба черешчатого в онтогенезе на территории от Германии до юго-востока Русской равнины

Fig. 1. The net photosynthetic productivity (а), biological productivity (б), net primary production (в) and absorption of N (г), P (д) and K (е) by the English oak trees during the ontogeny in the territory from Germany to the south-east of the Russian Plain

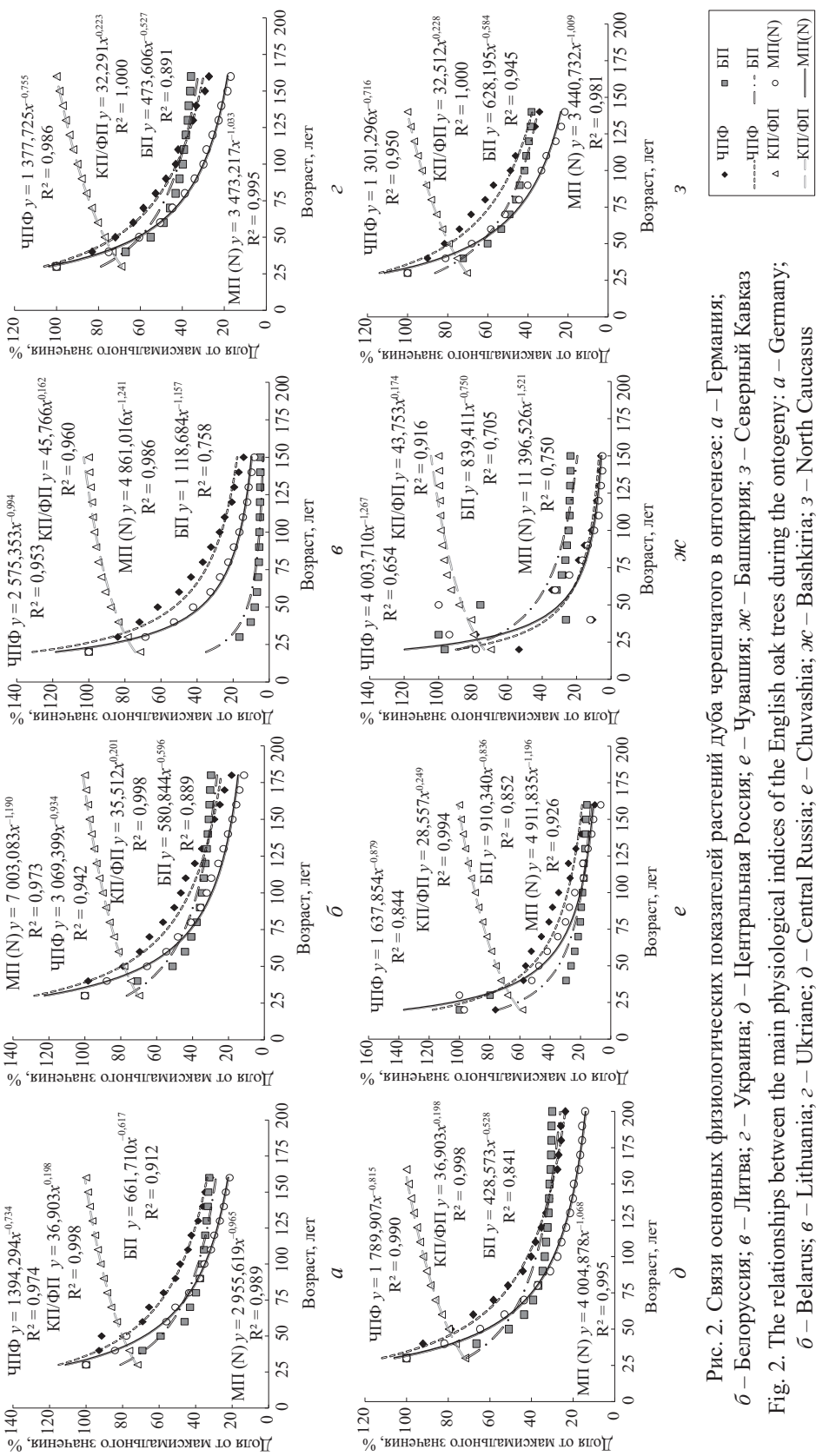


Рис. 2. Связи основных физиологических показателей растений дуба черешчатого в онтогенезе: а – Германия; б – Белоруссия; в – Литва; г – Украина; д – Центральная Россия; е – Чувашия; ж – Башкирия; з – Северный Кавказ; и – Крым. The relationships between the main physiological indices of the English oak trees during the ontogeny: a – Germany; б – Belarus; в – Lithuania; г – Ukraine; д – Central Russia; е – Chuvashia; ж – Bashkiriya; з – North Caucasus; и – Crimea.

Связь МП с ЧПФ и БП во всех регионах была высокой положительной ($r = 0,863...0,998$; $0,797...0,991$ соответственно). С возрастом растений БП уменьшалась не так резко, как ЧПФ и МП, что объясняется активизацией адаптивной реакции растения на снижение поглотительной деятельности корней, выразившейся в увеличении соотношения КП/ФП во всех регионах в 1,2–1,7 раза. Связь величины соотношения КП/ФП и возраста растений была высокой положительной ($r = 0,863...0,980$). ЛИ и КИ в пределах регионов в онтогенезе изменялись от 1,2 до 3,6 и от 1,8 до 6,3 раза соответственно. Связь соотношения КП/ФП с МП, ЧПФ и БП оказалась отрицательной ($r = -0,947...-0,991$; $-0,783...-0,988$; $-0,838...-0,924$ соответственно). Сравнительные количественные показатели физиологических процессов у растений дуба в возрасте от 30 до 120 лет представлены в табл. 2.

В 30-летнем возрасте ЧПФ по всем регионам находилась на уровне от 1,56 до 3,20 г/м²·день. Разница по этому показателю составила 2,1 раза. Корневые системы в регионах поглощали азота от 34 до 149 мг/м²·сут., различаясь между собой в 4,4 раза. ЧПП составила от 864 до 1799 г/м² с разницей между регионами в 2,1 раза. ЧМП(N) за вегетацию была от 3,0 до 6,79 г/м², отличаясь в 2,3 раза. Между ЧПП и ЧМП(N) по всем регионам установлена высокая положительная связь ($r = 0,927$). При формировании ЧПП растения дуба депонировали углерода от 432 до 900 г/м² площади питания. Высокие показатели отмечены в условиях Германии, Украины, Чувашии и Северного Кавказа, а низкие – Литвы и Белоруссии.

Для 60-летнего возраста древостоя по всем регионам зафиксировано снижение поглотительной деятельности корней. Более высокие значения сохранились в условиях Литвы, Центральной России и Башкирии – на уровне 61, 72 и 95 мг/м²·сут. соответственно. В других регионах этот показатель был от 18 до 34 мг/м²·сут. ЧПФ по регионам находилась на уровне от 0,96 до 2,51 г/м²·день. Значительное снижение фотосинтеза наблюдалось в условиях Литвы и Белоруссии. Разница между регионами составила 2,6 раза. Повышенная фотосинтетическая активность способствовала формированию в условиях Северного Кавказа высокой ЧПП (1792 г/м²).

Самая низкая ЧПП установлена в условиях Литвы и Белоруссии. В других регионах она находилась на уровне от 1135 до 1349 г/м², а разница между регионами составила 4 раза. Древостои дуба Северного Кавказа также поглощали наибольшее количество азота (5,58 г/м²). Минимальные значения были зафиксированы для Литвы и Белоруссии. В других регионах этот процесс характеризовался показателями от 3,53 до 4,56 г/м², различаясь между регионами в 4,2 раза. Между ЧПП и ЧМП(N) установлена высокая положительная связь ($r = 0,996$). При формировании ЧПП депонирование углерода протекало на уровне от 303 до 896 г/м², различаясь по регионам в 3,0 раза.

В 90-летнем возрасте древостоев поглощение азота во всех регионах было от 13 до 42 мг/м²·сут. Фотосинтетическая активность лежала в пределах 0,48...1,88 г/м²·день. Резкое снижение этого показателя наблюдалось у растений Башкирии (0,48 г/м²·день). В остальных регионах ЧПФ колебалась от 0,74 до 1,31 г/м²·день, а разница достигла 3,9 раза. Резкое падение ЧПП установлено для условий Башкирии и Литвы. Самые высокие показатели сохранились в условиях Германии (1325 г/м²) и Северного Кавказа (1357 г/м²). В других регионах значение находилось на уровне от 704 до 943 г/м².

Таблица 2

Количественные показатели чистой продуктивности фотосинтеза, поглощения азота, чистой первичной продукции, депонирования углерода, чистой минеральной продуктивности по азоту и эффективности формирования биомассы на единицу массы поглощенного азота у дуба черешчатого в возрасте 30–120 лет

The quantitative indices of net photosynthetic productivity, nitrogen absorption, net primary production, carbon sequestration, net mineral productivity for nitrogen and the efficiency of biomass formation per unit mass of absorbed nitrogen in the English oak trees aged 30–120 years

Регион	ЧПФ, г/м ² -день	МП (N), мг/м ² -сут.	ЧПП	Депонирова- но углерода		ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г	ЧПФ, г/м ² -день	МП (N), мг/м ² -сут.	г/м ² -площади питания в год			ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г																			
				ЧПП	Депонирова- но углерода					ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г	ЧПФ, г/м ² -день			МП (N), мг/м ² -сут.	ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г	ЧПФ, г/м ² -день	МП (N), мг/м ² -сут.	ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г												
																						ЧПП	Депонирова- но углерода	ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г	ЧПФ, г/м ² -день	МП (N), мг/м ² -сут.	ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г	ЧПФ, г/м ² -день	МП (N), мг/м ² -сут.	ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г
30 лет																																	
Германия	2,12	49	1799	900	5,66	318	1,80	28	1269	635	3,95	321																					
Литва	1,93	135	864	432	3,02	286	1,14	61	606	303	1,79	339																					
Белоруссия	1,56	34	874	437	3,00	291	0,96	18	806	403	2,52	320																					
Украина	2,42	37	1694	847	5,44	311	1,53	21	1349	675	4,56	296																					
Центральная Россия	2,08	132	1297	649	4,29	302	1,42	72	1200	600	3,65	329																					
Чувашия	3,20	57	1747	874	5,71	306	1,68	24	1158	579	3,53	328																					
Башкирия	2,46	149	1210	605	4,11	294	1,97	95	1135	568	3,53	322																					
Северный Кавказ	2,30	48	1642	829	6,79	242	2,51	34	1792	896	5,58	325																					
90 лет																																	
120 лет																																	
Германия	1,88	26	1325	663	3,90	340	1,11	15	783	392	2,39	328																					
Литва	0,74	42	383	192	1,29	297	0,48	23	228	114	0,64	356																					
Белоруссия	0,72	13	704	352	2,11	334	0,43	8	482	241	1,44	335																					
Украина	0,93	13	924	462	3,40	272	0,93	10	950	475	2,91	326																					
Центральная Россия	0,92	42	849	425	2,51	338	0,73	32	683	342	2,04	335																					
Чувашия	1,23	16	943	472	2,85	331	0,90	11	667	334	2,16	309																					
Башкирия	0,48	22	288	144	0,87	331	0,26	12	156	78	0,48	325																					
Северный Кавказ	1,31	16	1357	679	4,14	328	0,91	10	968	484	2,81	344																					

ЧМП(N) была от 0,87 до 4,14 г/м² площади питания. Снижение поглотительной деятельности корней отмечено для условий Башкирии, Литвы и Белоруссии. Повышенная ЧМП(N) сохранилась в древостоях Северного Кавказа (4,14 г/м²) и Германии (3,90 г/м²). В других регионах поглощение азота отмечено на уровне от 2,51 до 3,40 г/м². Между значениями ЧПП и ЧМП(N) установлена высокая положительная связь ($r = 0,982$). Депонирование углерода составило от 144 до 679 г/м² площади питания, различаясь по регионам в 4,7 раза.

В 120-летнем возрасте растения дуба поглощали азота от 8 до 32 мг/м²·сут., а разница между регионами составила 4 раза. Фотосинтетическая активность листового аппарата была на уровне от 0,26 до 1,11 г/м²·день. Самые низкие значения оказались характерны для условий Башкирии, Литвы и Белоруссии. Более высокие показатели фотосинтеза сохранились в древостоях Германии, Украины и Северного Кавказа. В регионах фотосинтетическая активность растений различалась в 4,3 раза. ЧПП во всех регионах была на уровне от 156 до 968 г/м². Как низкое накопление биомассы описывается для Башкирии, Литвы и Белоруссии. Повышенная ЧПП сформировалась в древостоях Северного Кавказа, Украины и Германии. В условиях Центральной России и Чувашии эти показатели зафиксированы соответственно на уровне 683 и 667 г/м². Различия в количестве сформированной ЧПП на 1 м² площади питания растений составили 6,2 раза. Поглощение корнями дуба азота было от 0,48 до 2,91 г/м². Минимальные значения установлены для Башкирии, Литвы и Белоруссии. Различия между регионами достигли 6,1 раза. Для ЧПП и ЧМП(N) всех регионов установлена высокая положительная связь ($r = 0,997$). При формировании ЧПП растения дуба депонировали углерода от 114 до 484 г/м² площади питания.

Приведенные в табл. 2 количественные показатели ЧПП и ЧМП(N) позволяют определить эффективность формирования биомассы растениями дуба в расчете на 1 г поглощенного азота в возрастные периоды древостоя от 30 до 120 лет. Несмотря на то, что насаждения представлены генетически неоднородными сеянцами и произрастают в контрастных экологических условиях, количество сформированной биомассы, приходящейся на единицу поглощенного азота, характеризуется значительным постоянством: коэффициент варьирования был на уровне 8,0; 3,8; 7,5 и 4,3 % соответственно в 30, 60, 90 и 120 лет, а в среднем по регионам на 1 г азота сформировано 293, 322, 321 и 332 г биомассы соответственно. Коэффициент корреляции между поглощением азота корнями дуба в онтогенезе и эффективностью его использования при формировании биомассы (г/м² площади питания) был отрицательным ($r = -0,926$).

Заклучение

Получены количественные показатели функционирования корневой системы, листового аппарата, чистой первичной продукции и депонирования углерода у растений дуба на уровне организма в возрасте древостоя от 10–20 до 140–200 лет на пространстве от Германии до юго-восточных пределов Русской равнины. Во всех регионах связь минеральной продуктивности с возрастом растений оказалась отрицательной, а биологическая продуктивность уменьшалась не так резко, как чистая продуктивность фотосинтеза и минеральная продуктивность, что объясняется активизацией адаптивной реакции растений на снижение поглотительной деятельности корней.

С возрастом растения все физиологические показатели уменьшались, а количественные значения для разных регионов различались по чистой продуктивности фотосинтеза в 2,1–4,3, а чистая первичная продукция и депонирование углерода – в 2,1–6,2 раза. Между чистой первичной продукцией и чистой минеральной продуктивностью по азоту по всем возрастам растений установлена высокая положительная связь ($r = 0,927 \dots 0,997$).

Использование эколого-физиологического анализа табличных данных продуктивности деревьев дуба позволяет установить характер взаимосвязи физиологических процессов в период формирования биомассы на уровне организма, что может служить теоретической основой при разработке технологических приемов повышения биологической продуктивности растений и определении количественных показателей чистой минеральной продуктивности по азоту, чистой продуктивности фотосинтеза, чистой первичной продукции и депонирования углерода с адаптацией к конкретным лесорастительным условиям. Принятие во внимание в модельных и прогностических расчетах адаптированных количественных физиологических процессов растения существенно повысит точность оценок биологических и карбоновых показателей лесных фитоценозов, имеющих важное экологическое и государственное значение.

Лучшими для произрастания семенных растений дуба являются условия Германии, Украины, Северного Кавказа, Чувашии и Центральной России, менее благоприятные – в Литве, Белоруссии и Башкирии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнов В.П., Лебедев Е.В. Фотосинтез и биологическая продуктивность лесообразующих пород Волго-Вятского региона // Актуал. проблемы лесн. хоз-ва и рациональное использование ресурсов Нижегородск. области. Н. Новгород: НГСХА, 2002. С. 107–116.

Besschetnov V.P., Lebedev E.V. Photosynthesis and Biological Productivity of Forest-Forming Species of the Volga-Vyatka Region. *Current Issues of Forestry and Rational Use of Resources in the Nizhny Novgorod Region*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2002, pp. 107–116. (In Russ.).

2. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: АН СССР, 1973. 203 с. Kurnaev S.F. *Forest Vegetation Zoning of the USSR*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1973. 203 p. (In Russ.).

3. Лазарева М.С., Ефименко В.И., Климович Л.К. Модели роста мягко-лиственно-дубовых насаждений Беларуси // Сб. науч. тр. / Нац. Акад. наук Беларуси. Ин-т леса. Гомель, 2010. Вып. 70. С. 66–75.

Lazareva M.S., Efimenko V.I., Klimovich L.K. Growth Patterns of Softwood-Oak Plantations in Belarus. *Collection of Scientific Proceedings*. Gomel, National Academy of Sciences of Belarus, Forest Institute, 2010, iss. 70, pp. 66–75. (In Russ.).

4. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Функционирование листового аппарата, корневой системы и биологическая продуктивность лиственницы сибирской на уровне организма в онтогенезе (на примере лиственничников Архангельской области) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 3. С. 9–19.

Lebedev V.M., Lebedev E.V. Functioning of the Leaf Apparatus, Root System and Biological Productivity of Siberian Larch on the Level of the Organism in Ontogeny (the Case of Larch Forests of the Arkhangelsk Region). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 3, pp. 9–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.3.9>

5. Лебедев Е.В. Биологическая продуктивность и минеральное питание ели европейской в онтогенезе в условиях северной Европы // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2012. № 198. С. 4–13.

Lebedev E.V. Biological Productivity and Mineral Nutrition of Norway Spruce in Ontogenesis in the Conditions of Northern Europe. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2012, no. 198, pp. 4–13. (In Russ.).

6. Лебедев Е.В. Биологическая продуктивность дуба черешчатого на уровне организма в онтогенезе в европейской части России // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 28–32.

Lebedev E.V. Biological Productivity of English Oak at the Organism Level in the Ontogeny in European Russia. *Lesnoj vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

7. Меницкий Ю.Л. Порядок (Fagales) семейство буковые // Жизнь растений в 6 т. М.: Просвещение, 1980. Т. 5. С. 293–311.

Menitskij Yu.L. Order (Fagales) Beech Family. *Life of Plants in 6 Vols.* Moscow, Prosveshchenie Publ., 1980, vol. 5, pp. 293–311. (In Russ.).

8. Молчанов А.Г. Функциональная характеристика фотосинтетического аппарата сосны, березы, дуба // Структура и функции лесов Европейской России / Институт лесоведения РАН. М., 2009. С. 80–105.

Molchanov A.G. Functional Characteristics of the Photosynthetic Apparatus of Pine, Birch, Oak. *Structure and Functions of Forests in European Russia*. Moscow, Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 80–105. (In Russ.).

9. Молчанов А.Г., Молчанова Т.Г., Мамаев В.В. Физиологические процессы у сеянцев дуба черешчатого при недостатке влаги // Лесоведение. 1996. № 1. С. 54–64.

Molchanov A.G., Molchanova T.G., Mamaev V.V. Physiological Processes in English Oak Seedlings under Moisture Deficiency. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1996, no. 1, pp. 54–64. (In Russ.).

10. Муромцев И.А. Активная часть корневой системы плодовых растений. М: Колос, 1969. 247 с.

Muromtsev I.A. *The Active Part of the Root System of Fruit Plants*. Moscow, Kolos Publ., 1969. 247 p. (In Russ.).

11. Ничипорович А.А. О методах учета и изучения фотосинтеза как фактора урожайности // Тр. ИФР АН СССР. 1955. Т. 10. С. 210–249.

Nichiporovich A.A. On Methods of Accounting and Studying Photosynthesis as a Factor in Crop Yield. *Proceedings of the K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology Russian Academy of Sciences*, 1955, vol. 10, pp. 210–249. (In Russ.).

12. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 763 с.

Usoltsev V.A. *Forest Phytomass in Northern Eurasia: Standards and Geographic Elements*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. 763 p. (In Russ.).

13. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 569 с.

Usoltsev V.A. *Phytomass and Primary Production of Eurasian Forests*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 569 p. (In Russ.).

14. Усольцев В.А., Колчин К.В., Часовских В.П. Чистая первичная продукция лесобразующих пород в климатических градиентах Евразии // Сиб. лесн. журн. 2018. № 2. С. 28–37.

Usoltsev V.A., Kolchin K.V., Chasovskikh V.P. Net Primary Production of Forest-Forming Species in Climatic Gradients of Eurasia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2018, no. 2, pp. 28–37. (In Russ.).

15. Цельникер Ю.Л., Корзухин М.Д., Семенов С.М. Модельный анализ широтного распределения продуктивности лесных пород России // Лесоведение. 2010. № 2. С. 36–45.

Tsel'niker Yu.L., Korzukhin M.D., Semenov S.M. Model Analysis of Latitudinal Distribution of Forest Species in Russia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2010, no. 2, pp. 36–45. (In Russ.).

16. Dryer E. Compared Sensitivity of Seedlings from 3 Woody Species (*Quercus robur* L., *Quercus rubra* L. and *Fagus sylvatica* L.) to Water-Logging and Associated Root Hypoxia: Effects on Water Relations and Photosynthesis. *Annals of Forest Science*, 1994, vol. 51, no. 4, pp. 417–428. <https://doi.org/10.1051/forest:19940407>

17. Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D., Utkin A., Pryaznikov A. Carbon Stock and Deposition in Phytomass of the Russian Forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, vol. 82, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/BF01182838>

18. Jiang L., Zhao W., Lewis B.J., Wei Y., Dai L. Effects of Management Regimes on Carbon Sequestration under the Natural Forest Protection Program in Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, pp. 1187–1194. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0542-0>

19. Jiao Y.Y., Ren H.E., Dong B. Optimal Estimation of Forest Carbon Sequestration Based on Eddy Correlation Method. *Advances in Computer Science, Intelligent System and Environment. Advances in Intelligent and Soft Computing*, 2011, vol. 105, pp. 421–426. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23756-0_68

20. Lundmark T., Bergh J., Strand M., Koppel A. Seasonal Variation of Maximum Photochemical Efficiency in Boreal Norway Spruce Stands. *Trees*, 1998, vol. 13, pp. 63–67. <https://doi.org/10.1007/s004680050187>

21. O'Connell K.E.B., Gower S.T., Norman J.M. Comparison of Net Primary Production and Light-Use Dynamics of Two Boreal Black Spruce Forest Communities. *Ecosystems*, 2003, vol. 6, pp. 236–247. <https://doi.org/10.1007/PL00021510>

22. Suvorova G.G., Oskorbina M.V., Kopytova L.D., Yankova L.S., Popova E.V. Seasonal Changes in Photosynthetic Activity and Chlorophylls in the Scots Pine and Siberian Spruce with Optimal or Insufficient Moistening. *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, vol. 4, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1134/S1995425511060105>

23. Xue L., Luo X., Wu X. Analysis of the Efficiency of Forestry Production and Convergence in China's Four Major Forest Areas Based on the Perspective of Carbon Sequestration Benefits. *Global Ecological Governance and Ecological Economy. Research Series on the Chinese Dream and China's Development Path*. Singapore, Springer, 2022, pp. 195–212. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7025-1_13

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*232:631.412

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-60-76

Влияние почвенных свойств в дискретных микроповышениях на рост сеянцев ели обыкновенной *Picea abies* (L.) Karst

А.С. Ильинцев^{1,2}✉, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [N-6286-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

Е.Н. Наквасина², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [A-5165-2013](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

А.Г. Волков², канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [D-7384-2017](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3082-6263>

А.П. Богданов^{1,2}, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [A-8611-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Н.А. Буньков², аспирант; ResearcherID: [MGW-2663-2025](#),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5216-8843>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; a.ilintsev@narfu.ru✉, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru, bunjkov.n@edu.narfu.ru

Поступила в редакцию 25.05.24 / Одобрена после рецензирования 14.08.24 / Принята к печати 16.08.24

Аннотация. Целью исследования было выявление наиболее значимых для обеспечения роста ели обыкновенной почвенных факторов корнеобитаемого слоя (водно-физические и агрохимические). Научные работы проводили в 5-летних культурах, созданных по микроповышениям, подготовленным экскаватором на свежей вырубке черничного типа леса в Вилегодском лесничестве Архангельской области. Использовали 2-летний посадочный материал ели обыкновенной с закрытой корневой системой (2,0 тыс. шт./га). На 1 микроповышение высаживали 2–3 сеянца: в центр, в край от ямы и в край у ямы, образующейся при подготовке посадочного места. Замеряли основные биометрические показатели у сеянцев (60 шт.) и у близкого по возрасту подроста ели (40 шт.) последующей генерации на пасеке. Для анализа данных применяли методы многомерной статистики. Определено, что наиболее отзывчивыми на различия условий произрастания являются высота растения, связанная с приростом, а также длина боковых корней. Выявлено, что по сходству водно-физических и агрофизических свойств в корнеобитаемом слое ели, растущей на пасеке, ближе центральная часть посадочного места. Эти условия способствовали и лучшему росту сеянцев в центре по сравнению с краями микроповышения (у ямы и от ямы). Установлено, что приоритет в обеспечении ростовых параметров ели в 1-е годы жизни в большей степени принадлежит водно-физическим свойствам, таким как высота насыпи, пористость, плотность твердой фазы, влажность, а также тесно связанным с ними плотности сложения и пористости аэрации. В то же время из агрохимических показателей значимыми оказались только содержание калия и фосфора (на уровне тенденции). В практическом отношении полученные результаты позволяют скорректировать рекомендации по дискретной обработке почвы экскаватором и размещению посадочного материала в посадочных местах. Они будут полезны

при прогнозировании роста посадочного материала посредством экспресс-методов почвенных исследований.

Ключевые слова: лесные культуры, рост, водно-физические свойства почвы, агрохимические свойства почвы, влияние на рост, моделирование взаимовлияния

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>. Базовые химические свойства почвы определены в аккредитованной испытательной лаборатории на базе ФГБУ САС «Архангельская».

Для цитирования: Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Волков А.Г., Богданов А.П., Буньков Н.А. Влияние почвенных свойств в дискретных микроповышениях на рост сеянцев ели обыкновенной *Picea abies* (L.) Karst // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 60–76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-60-76>

Original article

The Influence of Soil Properties in Discrete Mounds on the Growth of Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst.) Seedlings

Aleksey S. Ilintsev^{1,2✉}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6286-2019](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

Elena N. Nakvasina², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Alexey G. Volkov², Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [D-7384-2017](https://orcid.org/0000-0002-3082-6263), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3082-6263>

Alexander P. Bogdanov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.; ResearcherID: [A-8611-2019](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Nikita A. Bun'kov², Postgraduate Student; ResearcherID: [MGW-2663-2025](https://orcid.org/0009-0006-5216-8843), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5216-8843>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; a.ilintsev@narfu.ru✉, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru, bunjkov.n@edu.narfu.ru

Received on May 25, 2024 / Approved after reviewing on August 14, 2024 / Accepted on August 16, 2024

Abstract. The aim of the study has been to identify the most significant soil factors of the root layer (water-physical and agrochemical) for ensuring the growth of Norway spruce. The research has been carried out in 5-year-old crops created at the mounds prepared by an excavator at the fresh cutting of blueberry-type forest in the Vilegodsky forestry of the Arkhangelsk Region. 2-year-old planting stock of Norway spruce with a closed root system (2.0 thousand pcs./ha) has been used. For 1 mound, 2–3 seedlings have been planted: in the centre, at the edge away from the hole, and at the edge near the hole formed during the preparation of the planting site. The main biometric parameters have been measured in seedlings (60 pcs.) and in similarly aged spruce undergrowth (40 pcs.) of the subsequent generation in the cutting strip. Multivariate statistics methods have been used to analyze the data. It has been determined that the most responsive to differences in growing conditions are plant height associated with growth, as well as the length of lateral roots. It has been found that, based on the similarity of water-physical and agrophysical properties in the root layer of spruce grow-



ing in the cutting strip, the central part of the planting site is closer. These conditions have also contributed to a better growth of seedlings in the centre, compared to the edges of the mound (near the hole and away from the hole). It has been established that the priority in ensuring the growth parameters of spruce in the 1st years of life largely belongs to water-physical properties, such as the mound height, porosity, solid body density, and moisture content, as well as the closely related density of soil structure and aeration porosity. At the same time, of the agrochemical indicators, only the content of potassium and phosphorus (at the trend level) have turned out to be significant. In practical terms, the results obtained make it possible to adjust the recommendations for discrete soil tillage with an excavator and the placement of planting material in planting sites. They will be useful in predicting the growth of planting material using rapid methods of soil research.

Keywords: forest crops, growth, water-physical properties of the soil, agrochemical properties of the soil, impact on growth, modeling of mutual influence

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>. The basic chemical properties of the soil have been determined in an accredited testing laboratory at the Federal State Budgetary Institution “Arkhangelskaya” Agrochemical Service Station.

For citation: Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Volkov A.G., Bogdanov A.P., Bun'kov N.A. The Influence of Soil Properties in Discrete Mounds on the Growth of Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst) Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 60–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-60-76>

Введение

Технологии лесовосстановления в условиях северного региона рассматривались с различных точек зрения: применение разных технологических приемов в дифференцированных лесорастительных условиях, влияние способов создания лесных культур и видов посадочного материала на рост сеянцев и саженцев [1, 5, 10, 11, 16]. Признано, что особое внимание при закладке лесных культур необходимо уделять обработке почвы, обеспечивая высокий уровень агротехнического фона в посадочных местах [9]. Влияние обработки почвы сказывается на росте культур в 1-е десятилетия [1, 2, 8, 10].

Обработка почвы при лесохозяйственном освоении участка считается запланированным экологическим нарушением [21], но при ее проведении можно добиться оптимальных свойств почвы или, наоборот, ухудшить их [10, 40]. Приоритетным считается максимальное использование естественного плодородия и создание условий, соответствующих природной экосистеме [11]. Поэтому одним из важнейших мероприятий становится оценка агрохимических свойств почв [8, 42], что подводит к междисциплинарным исследованиям и признается тенденциями будущего в лесовосстановлении [35, 37]. Изменение агрохимических свойств почв при обработке, их связь с ростом посаженных растений, динамика сукцессионных сдвигов в процессе восстановления экосистемы [5, 41] являются приоритетными при выборе лесокультурных технологий.

При обработке почвы меняются многие свойства, которые определяют рост растений, важно установить причинно-следственную связь в разных лесорастительных условиях и при разных технологиях воздействия в процессе создания лесных культур [33]. Способы обработки почвы, влияя на качество

посадочных мест, определяют количественные взаимосвязи между условиями произрастания, выживаемостью и ростом сеянцев [29].

При оценке обработки почвы следует применять комплекс приемов, включая анализ строения, гранулометрии, водно-физических и агрохимических показателей [5, 10, 15, 22, 27]. Изменение свойств почвы прямо и косвенно влияет на растения – через поддержание биогеохимических циклов, формирование растительных и микробных сообществ [19, 20]. По мнению Л.О. Карпачевского [7], рост сосны и ели на 70 и 90 % соответственно определяется именно почвенными факторами.

Не все почвенные свойства влияют на адаптацию сеянцев в посадочных местах равнозначно. Содержание влаги и водный баланс почв разного строения и гранулометрического состава являются в этом случае определяющими и действующими в большей степени, чем наличие питательных веществ, на приживаемость и рост растений, обеспечивая доступность питательных веществ [3, 26, 28, 38]. При различных способах обработки почвы нередко физические свойства (сложение, порозность) оказывались более значимы для роста растений, чем химические, в т. ч. содержание питательных веществ [5]. Именно эти свойства обеспечивают насыщение почвы водой и кислородом, поддерживают биогеохимические циклы, доступность питательных веществ и фотосинтезирующую деятельность растительности.

При оценке почвы в ходе высадки лесных культур с применением технологий предварительной обработки и созданием посадочных мест, в т. ч. дискретных, в различных лесорастительных условиях необходимо рассматривать комплекс почвенных свойств, учитывая при этом исходные природные условия местообитаний и приобретенные под влиянием технологических приемов. Разные технологические приемы (рыхление, оборот пласта, создание микроповышений и др.) обуславливают разницу в строении и свойствах посадочного места, которые со временем эволюционируют, но на определенном этапе изучения, по крайней мере до 5–6-летнего возраста культур, в период свободного стояния растений [5], служат основанием для подбора способов обработки при планировании лесохозяйственных мероприятий.

Цель нашего исследования – выявление закономерности влияния комплекса водно-физических и агрохимических свойств почвы на рост и развитие ели обыкновенной, отбор наиболее значимых почвенных факторов для обеспечения ее роста в 5-летних культурах, созданных по дискретным экскаваторным микроповышениям на вырубке черничного типа леса для экологического управления процессом искусственного лесовосстановления.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в 2023 г. в 5-летних культурах (биологический возраст ели 7 лет) в черничном типе условий произрастания в Вилегодском лесничестве Архангельской области (Двинско-Вычегодский таежный район). До сплошной рубки в 2017 г. на месте лесокультурной площади произрастало насаждение со следующими таксационными характеристиками: состав древостоя – 4Е1С3ОС2Б, класс возраста – 7, полнота – 0,7, высота – 19 м, диаметр – 20 см, запас древесины – 270 м³/га, тип леса – ельник черничный, класс бонитета – IV. Рельеф – равнинный с перепадами высот 1–3 м. Почва мелкоподзолистая

иллювиально-железистая супесчаная на среднем суглинке. Из-за отсутствия достаточного количества подроста ели (0,5 тыс. шт./га) весной 2019 г. была произведена механизированная обработка почвы экскаватором Hitachi ZX 180 LC непосредственно перед посадкой. Обработка почвы осуществлялась методом нерядового дискретного создания микроповышений (насыпей) через 1,0–1,5 м. Экскаватор формировал микроповышения шириной в среднем 1,0 м (от 0,6 до 1,1 м) и длиной 1,1 м (от 0,8 до 1,4 м). Приподнятые посадочные места на 10–35 см состояли из перевернутого слоя лесной подстилки, расположенной на нижележащей неповрежденной лесной подстилке, и были покрыты минеральной почвой. Для посадки использовали стандартный 2-летний районированный посадочный материал ели обыкновенной с закрытой корневой системой. При посадке количество сеянцев было не менее 2 тыс. шт./га. На одно микроповышение высаживали 2–3 сеянца: в центр, в край от ямы и в край у ямы, образующейся при подготовке посадочного места.

На пробных площадях провели детальную оценку состояния и роста изучаемых культур и подроста ели последующей генерации (пасака), у которых измерили следующие биометрические показатели: а) надземную часть, в т. ч. высоту – от поверхности почвы до верхушечной почки (см), прирост по высоте (см), а также диаметр стволика на уровне поверхности почвы (см); б) подземную часть – ширину и длину развития корневой системы. У сеянцев отмечали места посадки в микроповышения: в центр, в край от ямы и в край у ямы. На лесокультурной площади всего было измерено 60 сеянцев в различных местах микроповышения и 40 экземпляров близкого по возрасту подроста ели.

В местах произрастания сеянцев в изучаемых культурах и подроста ели в пределах корнеобитаемого слоя взяли образцы почвы для оценки ее свойств с использованием устоявшихся в лесном почвоведении методов [13]. Образцы почвы отбирали с помощью металлического цилиндра с режущими краями (бура) объемом 52,78 см³ (диаметр – 4,1 см, длина – 4 см).

В лабораторных условиях образцы почвы взвесили (с точностью до 0,01 г) и высушили при температуре 105 °С до постоянной массы. Далее установили основные физические свойства почвы: 1) полевую влажность; 2) плотность сложения; 3) плотность твердой фазы пикнометрически; 4) общую пористость; 5) пористость аэрации [12]. pH_{KCl} солевой вытяжки определяли в соответствии с ГОСТ 26483–85, массовую долю органического вещества (C) – ГОСТ 26213–2021 п. 6.1, массовую долю подвижных форм калия (K₂O) и фосфора (P₂O₅) – ГОСТ Р 54650–2011, а общий азот (N) – ГОСТ Р 58596–2019 п. 7.1.

Для анализа данных применяли методы многомерной статистики. Различия в биометрических показателях культур на разных микросайтах и подроста ели, а также влияние на них почвенных свойств устанавливали с помощью метода прямой (ограниченной) ординации RDA [30]. Он представляет собой прямое расширение множественной регрессии для моделирования данных с многомерным откликом (биометрические показатели деревьев). Результатом является сжатое пространство признаков с осями, обусловленными (взвешенными) независимыми (почвенными) переменными. Такие оси объясняют вариацию зависимой матрицы откликов от матрицы предикторов [18]. Перед анализом данные стандартизировались.

Статистическую значимость различий между участками по биометрическим показателям роста деревьев определяли с помощью дисперсионного

анализа, основанного на матрице сходства деревьев [17, 36]. В качестве меры различий использовали расстояние Эвклида. Значение p получали посредством перестановочного теста [34]. Анализ проводили в среде r [43]. Применяли пакеты: *vegan* [39], *ggplot2* [44].

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение показателей роста близкой по возрасту ели естественного происхождения (пасека) и высаженных в различные сайты посадочного места, подготовленного экскаватором, 2-летних сеянцев с закрытой корневой системой показало их заметное отличие ($R^2 = 0,18$; $p = 0,009$). Аналогичные результаты дал и подобный эксперимент, выполненный шведскими учеными [23].

Подрост ели по всем замеренным биометрическим показателям превосходит лесные культуры (рис. 1). Для него характерен линейный среднегодовой прирост 10,5 см, что обеспечивает среднюю высоту экземпляров 55 см, и хорошее развитие корневой системы, как главного, так и боковых разветвлений.

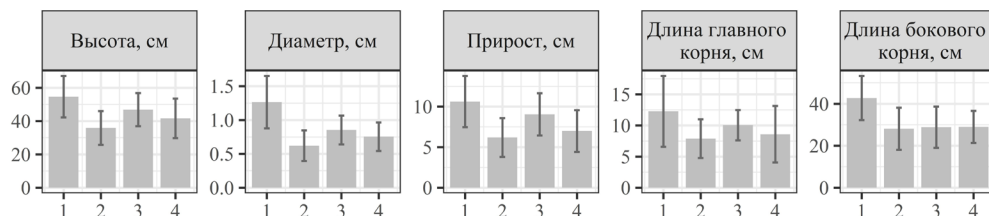


Рис. 1. Биометрические показатели культур и подроста ели на микросайтах:

- 1 – пасека; 2 – край микроповышения у ямы; 3 – центр микроповышения;
4 – край микроповышения от ямы. Среднее значение \pm стандартное отклонение

Fig. 1. The biometric indicators of spruce crops and undergrowth in microsites:

- 1 – cutting strip; 2 – edge of the mound near the hole; 3 – centre of the mound;
4 – edge of the mound away from the hole. Mean value \pm standard deviation

Рост ели в культурах, несмотря на обработку почвы, снижен во всех микросайтах посадочного места, что связано с «послепосадочным стрессом», который может продолжаться несколько лет [11] и зависит от разложения комка субстрата и выхода корневой системы за его пределы. Это хорошо демонстрирует рис. 1: и длина главного корня, и длина боковых корней ели в культурах ниже, чем на пасеке.

При решении вопроса о расположении сеянца в посадочном месте важно учитывать факторы, обеспечивающие лучший рост по отношению к естественным условиям. В разных местах одного микроповышения рост ели отличается, и хорошо заметно, что он активнее в центре, чем по краям. Это связано с переслоенностью почвы в разных местах микроповышения. Ранее [6] было установлено, что в центре микроповышения создаются более выровненные условия строения турбированной экскаватором толщи, чем по краям. В центре микроповышения почва чаще представлена легкими и средними суглинками срединных и нижних горизонтов. Тогда как для краев микроповышений характерна превосходящая изменчивость почвы по составу за счет перемешанности горизонтов и большего участия в толще легкого по гранулометрическому составу неплодородного подзолистого горизонта. В подобных опытах шведских ученых [23] также были отмечены различия в росте сеян-

цев, высаженных в центре и по краям значительного по размерам посадочного места. Они связывают различия в росте с наличием прослоек органики и минеральной почвы.

Заметно (см. рис. 1), что у сеянцев в разных частях посадочного места нет различий лишь по скорости выхода боковых корней из субстратного кома, что, вероятно, связано с явлением хемотропизма. Видимо, в это период развития сеянцев и разложения субстрата различия в почвенных условиях в разных сайтах не обеспечивают превалирования по сравнению с почвенными условиями торфяного субстрата.

По комплексу биометрических показателей сеянцы ели, произрастающие в центре микроповышения, более похожи на подрост пасеки, чем сеянцы, находящиеся по его краям (рис. 2). При этом различия все же являются статистически значимыми ($R^2 = 0,20$; $p = 0,002$). Попарное сравнение показывает, что наибольший вклад в различия сеянцев в центре микроповышения и на пасеке вносит длина бокового корня, которая определяет около 42 % различий признаков в сравниваемой паре (табл. 1). По другим изученным признакам (рост, прирост, диаметр стволика, длина главного корня) различия не доказаны, что предполагает влияние на рост сеянцев в центре микроповышения условий, обеспеченных комплексом почвенных свойств, складывающихся при обработке.

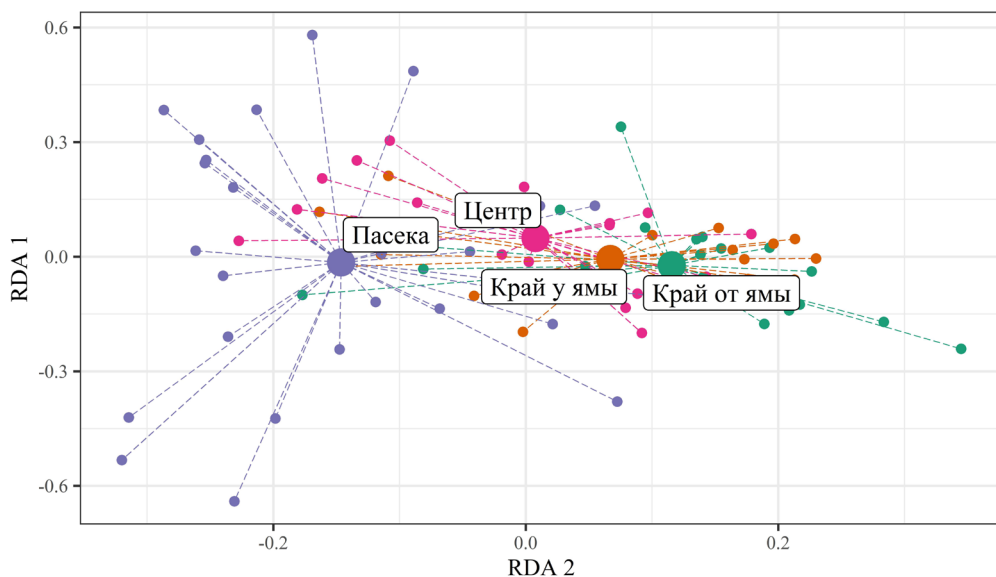


Рис. 2. Результаты прямой ординации деревьев на разных микросайтах в пространстве первых 2 осей (RDA 1 и RDA 2)

Fig. 2. The results of direct ordination of trees on different microsites in the space of the first 2 axes (RDA 1 and RDA 2)

Парное сравнение кластера подростка с сеянцами, произрастающими на краях посадочного места (у ямы, от ямы), показывает существенное отличие по всем биометрическим признакам. Наибольший вклад в различия между этими парами вносит линейный рост (высота) – 40 %. У подростка средний прирост по высоте на 31–54 % больше, чем у сеянцев на краях микроповышений. Можно предположить, что влияние оказывают различия в водном режиме, связанном

со строением почвенной толщи в краевых сайтах, где она насыщена легким по гранулометрическому составу подзолистым горизонтом. При возможном летнем подсыхании верхних слоев почвы в посадочном месте снижается доступность питательных веществ и рост растений [15, 28]. При этом затормаживается разложение торфяного кома субстрата, что не только уменьшает обеспечение растений азотом, а следовательно, и рост [24], но также способствует закреплению боковых корней в коме [11].

Таблица 1

Вклад независимых переменных в различия сеянцев ели, произрастающих на разных микросайтах
The contribution of independent variables to differences in spruce seedlings growing in different microsites

Признак	Стандартное отклонение	Отношение	Накопленная степень различий	p
<i>Пасека – Край у ямы (R² = 0,36; p = 0,001)</i>				
Высота, см	0,069	1,52	0,43	0,001***
Длина боковых корней, см	0,065	1,33	0,77	0,001***
Длина главного корня, см	0,025	1,09	0,88	0,036*
Прирост, см	0,018	1,43	0,99	0,001***
Диаметр, см	0,002	1,59	1,00	0,001***
<i>Пасека – Край от ямы (R² = 0,31; p = 0,002)</i>				
Высота, см	0,057	1,52	0,40	*
Длина боковых корней, см	0,049	1,53	0,75	0,079.
Длина главного корня, см	0,024	1,24	0,89	0,002**
Прирост, см	0,015	1,49	0,99	0,013*
Диаметр, см	0,002	1,36	1,00	0,001***
<i>Пасека – Центр микроповышений (R² = 0,20; p = 0,002)</i>				
Длина боковых корней, см	0,050	1,53	0,42	0,053
Высота, см	0,045	1,48	0,79	0,987
Длина главного корня, см	0,020	0,98	0,90	0,951
Прирост, см	0,012	1,33	0,99	0,979
Диаметр, см	0,002	1,29	1,00	0,257
<i>Центр микроповышений – Край у ямы (R² = 0,11; p = 0,014)</i>				
Высота, см	0,063	1,34	0,44	0,212
Длина боковых корней, см	0,049	1,32	0,77	0,665
Прирост, см	0,016	1,34	0,89	0,073
Длина главного корня, см	0,014	1,41	0,99	0,890
Диаметр, см	0,001	1,56	1,00	0,890
<i>Центр микроповышений – Край от ямы (R² = 0,07; p = 0,050)</i>				
Высота, см	0,047	1,52	0,42	0,855
Длина боковых корней, см	0,037	1,46	0,74	0,995
Длина главного корня, см	0,014	1,81	0,88	0,333
Прирост, см	0,013	1,43	0,99	0,681
Диаметр, см	0,001	1,38	1,00	1,000

Окончание табл. 1

Признак	Стандартное отклонение	Отношение	Накопленная степень различий	p
<i>Край от ямы – Край у ямы ($R^2 = 0,01$; $p = 0,279$)</i>				
Высота, см	0,057	1,36	0,43	0,558
Длина боковых корней, см	0,050	1,23	0,77	0,833
Длина главного корня, см	0,018	1,33	0,90	0,448
Прирост, см	0,013	1,28	0,99	0,960
Диаметр, см	0,001	1,48	1,00	0,991

Примечание: Полу жирным шрифтом выделены достоверные различия. Уровень значимости: *** – 0; ** – 0,001; * – 0,01; . – 0,05.

По комплексу ростовых показателей различия между кластерами сеянцев в центре посадочного места и по его краям подтверждаются лишь на уровне статистической тенденции ($R^2 = 0,07$; $p = 0,050$; $R^2 = 0,01$; $p = 0,279$). В то же время сенцы ели в центре микроповышения на 21–22 % превосходят в росте сеянцы по краям, но при этом разница в среднем приросте за 3 года незначительна.

Попарное сравнение позволяет выделить группу биометрических показателей из числа использованных при наблюдении, наиболее отзывчивых на различия условий произрастания, вносящих преобладающий вклад в различия между кластерами. Прежде всего в число таких показателей входят высота растения, связанная с приростом (по крайней мере за последние 3 года), а также длина боковых корней. Во всех случаях попарного сравнения диаметр стволика у шейки корня не вносит существенного вклада в различия подроста и культур на микро-сайтах, несмотря на различия, проявляющиеся в абсолютных единицах (диаметр подроста ели на 21–45 % выше, чем диаметр культур в микроповышениях).

Водно-физические и агрохимические свойства почвы в посадочном месте зависят от исходной почвы и определяются степенью ее перемешанности и строением турбированных горизонтов. В подзолистых почвах на тяжелых породах вклад в свойства почвы в посадочных местах будут вносить и верхние легкие горизонты (подзолистый), и более тяжелые срединные и нижние (почвообразующая порода), которые на мелких северных почвах может захватывать ковш экскаватора. Окажет влияние и технология подготовки посадочного места (переворот слоев почвы, уплотнение головкой ковша и т. п.). Легко определяемым и удобным для статистических расчетов показателем служит высота сложения посадочного места относительно уровня пашки. Так, в нашем случае в центре микроповышения она составляла 21,9 см (с колебаниями от 12 до 32 см), на краю от ямы – 27,9 см (от 12 до 45 см), на краю у ямы – 19,1 см (от 10 до 30 см). Оседание холма с течением времени считается потенциальной причиной снижения роста растений [25]. Оптимальная высота насыпи составляет 5–10 см в высоту на почвах с мелкой текстурой и 15–20 см в высоту на почвах со средней [31].

По микросайтам в пределах посадочного места различия незначительны по всем показателям водно-физических и агрохимических свойств. Так, плотность твердой фазы колеблется от 2,04 до 2,08 г/см³, пористость – от 34,6 до 37,3 %, пористость аэрации – от 11,5 до 13,2 % (рис. 3). В то же время заметно сниженное содержание влаги в момент исследования (сентябрь) в центре посадочного места (на 8 %) по сравнению с его краями. Считается, что через

2–3 года после обработки почвы под лесные культуры различия между водно-физическими и агрохимическими свойствами сглаживаются за счет эволюции биогеоценоза [7].

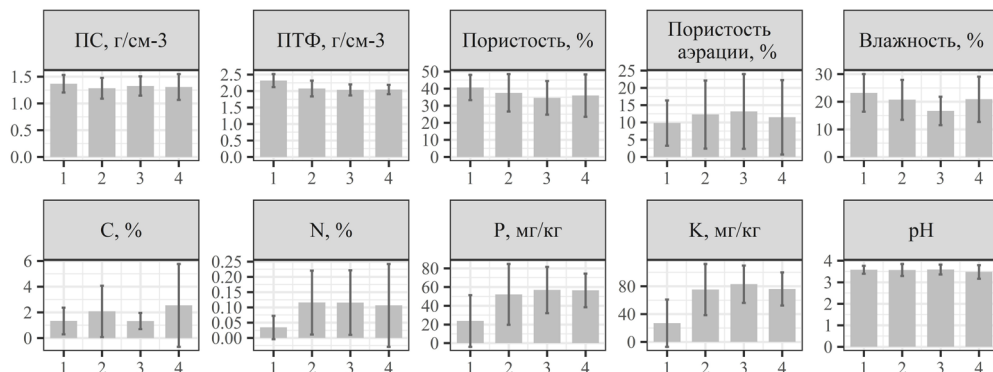


Рис. 3. Водно-физические и агрохимические свойства почвы на микросайтах:

1 – пасека; 2 – край микроповышения у ямы; 3 – центр микроповышения; 4 – край микроповышения от ямы (ПС – плотность сложения; ПТФ – плотность твердой фазы). Среднее значение \pm стандартное отклонение

Fig. 3. The water-physical and agrochemical soil properties in microsites:

1 – cutting strip; 2 – edge of the mound near the hole; 3 – centre of the mound; 4 – edge of the mound away from the hole (ПС – density of soil structure; ПТФ – solid body density). Mean \pm standard deviation

В целом для нативной необработанной почвы пасеки характерна меньшая изменчивость признаков. Различия по водно-физическим свойствам почвы на пасеке проявляются в большей влажности (23,1 %) и меньшей скважности аэрации (11,8 %), а также в повышенной плотности твердой фазы почвы (2,31 г/см³) по сравнению с обработанной почвой, где в снижение плотности вносит вклад примесь органики лесной подстилки.

При сравнении почвенных свойств разных сайтов посадочного места с пасекой установлены существенные различия: для центра посадочного места – по высоте отсыпанной толщи, влажности и плотности сложения; для посадочных мест на краю (от ямы) – по высоте отсыпанной толщи и плотности сложения. В обоих случаях существенно значимы различия по содержанию калия и фосфора в корнеобитаемой толще. Наибольшее число значимо отличающихся от пасеки показателей установлено для посадочного места на краю ямы. Значимо отличаются все изученные показатели, кроме пористости аэрации и массовой доли общего азота.

Кислые и бедные питательными веществами подзолистые почвы на пасеке по своим агрохимическим свойствам являются типичными для региона, но их обработка может усиливать биохимические процессы. Все агрохимические показатели в корнеобитаемом слое пасеки ниже, чем в микроповышениях. Так, доля органического вещества составляет 1,44 %, доля азота – 0,061 %, подвижных форм фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) – 36,6 и 33,7 мг/кг соответственно. При этом как нативная, так и обработанная почва остаются кислыми, $pH_{KCl} = 3,5$ –3, 6.

Предикторами усиления биологического круговорота и повышения качества почв в первую очередь будут доступ кислорода и привнос органики при турбировании, как в результате примешивания к минеральной части, так и при образовании двойного слоя лесной подстилки при обороте пласта верхнего

слоя почвы экскаватором. Считается, что такие микроповышения активизируют выработку азота [32] за счет разложения добавленной при формировании посадочного места органики. Именно органическое вещество при разложении обеспечивает почву азотом и элементами питания, стимулирующими рост растений [4].

В нашем случае повышение содержания подвижных калия и фосфора в корнеобитаемом слое посадочного места значимо отличается от почвы на пасеке. Различия по органическому углероду доказаны в парах пасека–сайт у ямы и пасека–центр (на уровне тенденции). Однако по расположению растений в пределах посадочного места, подготовленного экскаватором, различия несущественны: общий азот изменяется в диапазоне 0,106–0,116 %, содержание подвижных форм фосфора – 52,1–56,9 мг/кг, подвижных форм калия – 75,3–83,0 мг/кг. Наиболее значительно варьирует в пределах посадочного места доля органического вещества и общего азота (1,33–2,54 и 0,106–0,116 % соответственно). При этом наименьшее содержание органического углерода отмечено в центре посадочного места в совокупности с повышенным содержанием там элементов питания. К этому приводит разложение органики в условиях водно-физических свойств почвы в центре посадочного места, о которых упоминалось выше: снижение влажности и повышение доступа воздуха/кислорода для обеспечения биохимических процессов.

Водно-физические и агрохимические факторы связаны между собой, действуют и прямо, и косвенно, важно выделить наиболее репрезентативные, значимо влияющие на рост растений. Это может быть ограниченное число факторов [5, 7], характерное для конкретных лесорастительных условий.

При наличии большого числа разнонаправленных показателей использовали анализ с многомерным откликом, который позволяет определить комбинации предикторов, объясняющих максимальную изменчивость переменных показателей. Модель множественной регрессии на моделирование данных с многомерным откликом является статистически значимой ($F = 4,7445$; $p = 0,0001$).

Анализ избыточности (RDA) показал, что почвенные свойства обуславливают до 36 % дисперсии биометрических параметров ели, из них 32 % приходятся на 1-ю ось (RDA 1). Неучтенные факторы, которые, вероятно, относятся к абиотическим, объясняют 64 % вариабельности биометрии саженцев, с долей 1-й оси PC1 равной 41 %.

Селекция модели RDA с помощью информационного критерия (AIC) и коэффициентов детерминации (R^2) позволила нам выявить почвенные факторы, с наибольшей силой воздействующие на рост ели (табл. 2). В их роли выступают водно-физические свойства почвы (пористость, влажность, плотность твердой фазы) и высота насыпи. Вместе они описывают 34 % изменчивости сеянцев ели (модель № 5), что на 2 % меньше, чем модель № 1. Она хоть и включает в себя агрохимические свойства почв, но влияние их настолько мало, что снижает приведенный коэффициент детерминации, штрафующий модель за введение предикторов, слабо увеличивающих ее мощность, до 0,28. Априори можно также признать значимыми для обеспечения биологического роста ели в данных условиях произрастания плотность сложения почвы и пористость аэрации, исключенных, однако, из модели по причине их высокой корреляции с рассматриваемыми свойствами почвы (VIF равен 75 и 36 соответственно).

Таблица 2

Статистические характеристики моделей RDA
The statistical characteristics of RDA models

Число переменных	Коэффициент детерминации		Псевдокритерий AIC	Псевдо-F-статистика	
	Обычный	Приведенный		F	Pr (>F)
Модель 1: $Y \sim \text{ПТФ} + \text{П} + \text{ВН} + W + \text{C} + \text{N} + \text{P} + \text{K} + \text{pH}$					
9	0,36	0,28	119,06	4,74	0,0001
Модель 2: $Y \sim \text{ВН}$					
1	0,23	0,22	119,40	24,49	0,0001
Модель 3: $Y \sim \text{ВН} + \text{П}$					
2	0,30	0,28	112,68	17,82	0,0001
Модель 4: $Y \sim \text{ВН} + \text{П} + W$					
3	0,31	0,29	112,39	12,79	0,0001
Модель 5: $Y \sim \text{ВН} + \text{П} + W + \text{ПТФ}$					
4	0,34	0,30	112,03	10,03	0,0001

Примечание: ПТФ – плотность твердой фазы, г/см³; П – пористость, %; W – влажность, %; ВН – высота насыпи, см; C – органический углерод, %; N – общий азот, %; P – фосфор, мг/кг; K – калий, мг/кг; pH – pH_{KCl}.

То есть агрохимические показатели стали факторами, в меньшей степени обеспечивающими рост ели в 5-летних культурах и близкого по возрасту подраста на пасеке. Подобный приоритет влияния на рост сеянцев хвойных пород в культурах был отмечен ранее [5] авторами, которые выделили 5 репрезентативных признаков, наиболее отражающих биологический рост, среди которых также превалировали водно-физические свойства: плотность сложения, пористость, пористость аэрации, влажность и содержание органического вещества. По мнению авторов, теснота корреляционной связи с названными показателями в 4-летник культурах на плужных пластах торфянисто-подзолистой почвы составляла 0,897.

Роль органического вещества и элементов питания почвы в обеспечении биологической составляющей роста хвойных пород в различных условиях произрастания отмечали и другие ученые [4, 7, 14, 15], имея в виду доступность и соотношение высвобождающихся при разложении органики химических элементов и оксидов. Однако успешность разложения органического вещества и доступность питательных веществ прямо и косвенно определяется комплексом водно-физических свойств почвы в корнеобитаемой толще, связанных с условиями местопроизрастания и обработкой почвы.

Визуализация направленности и силы влияния почвенных факторов на биометрические показатели роста ели в культурах и на пасеке в условиях черничного типа леса представлена на рис. 4. Хорошо заметна разнонаправленность векторов водно-физических свойств почвы и одного фактора, непосредственно связанного с обработкой почвы под лесные культуры – высоты насыпи в разных частях большого посадочного места, созданного экскаватором. Связь значимая и должна учитываться при создании лесных культур и решении вопроса о размещении сеянцев при посадке: при увеличении высоты насыпи посадочного места рост сеянцев снижается.

Если оценить векторность почвенных показателей пасеки и посадочных мест, то визуализация модели отражает лучшие водно-физические условия

в корнеобитаемом слое ели для пасеки. Расположение пасеки в пространстве осей RDA показывает оптимум почвенных свойств для произрастания семян ели. По мере удаления от него продуктивность ели снижается. Это происходит с увеличением высоты насыпи, уменьшением влажности, пористости (пористости аэрации) и плотности твердой фазы, а также плотности сложения. Ближе всего к этим условиям условия произрастания, которые создаются в центре посадочного места. Изученные 5 агрохимических показателей лучше в посадочном месте, но различия сглажены и не обеспечивают дифференциации роста растений на разных сайтах. В данном возрасте культур влияние агрохимических свойств почвы практически не проявилось и доказано не было.

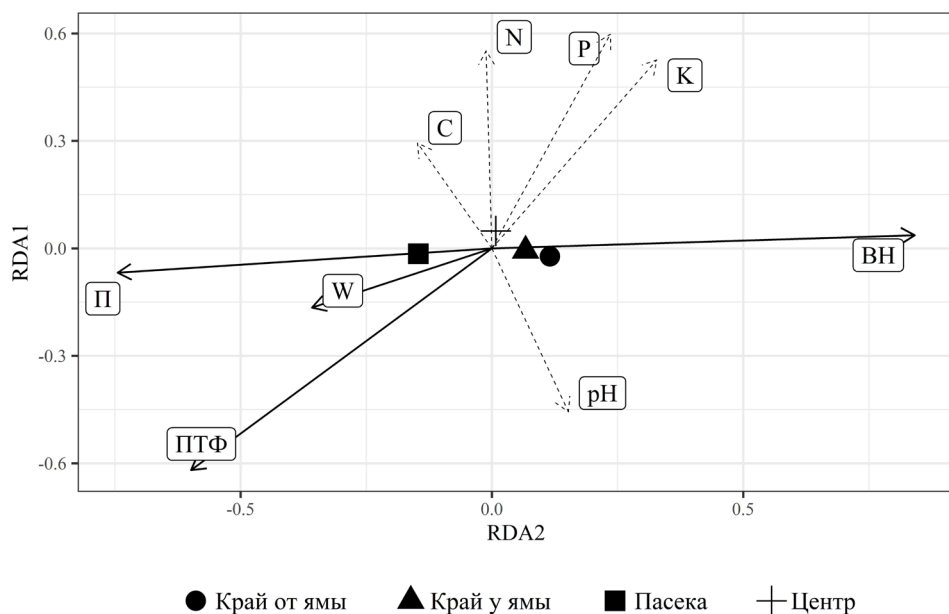


Рис. 4. Влияние почвенных свойств на рост деревьев на разных микросайтах в пространстве первых 2 осей прямой ординации (RDA 1 и RDA 2).

Стрелками указаны векторы. Условные обозначения – см. табл. 2

Fig. 4. The influence of soil properties on tree growth in different microsites in the space of the first 2 axes of direct ordination (RDA 1 and RDA 2). The arrows indicate the vectors.

For the legend see Table 2

Заключение

Проведенные расчеты с использованием многомерного анализа (RDA) позволили на примере 5-летних культур ели обыкновенной, созданных в черничном типе леса на подзолистой почве (Вилегодский район Архангельской области), выявить и оценить влияние почвенных свойств на рост семян, высаженных в различные части большого посадочного места, созданного экскаватором. Результаты сопоставлены с ростом близкого по возрасту подроста последующей генерации на пасеке, также определено наиболее подходящее размещение семян при используемой технологии обработки почвы.

Наиболее отзывчивыми на различия условий произрастания являются высота растения, связанная с приростом (по крайней мере за последние 3 года), а также длина боковых корней. Диаметр стволика у шейки корня не вносит су-

щественного вклада в различия подроста и культур на микросайтах, несмотря на несходство, проявляющееся в абсолютных единицах.

Установлено, что ростовые параметры ели в 1-е годы жизни обеспечиваются прежде всего водно-физические свойства, такие как пористость, плотность твердой фазы, влажность, а также тесно связанные с ними плотность сложения и пористость аэрации. В то же время из агрохимических свойств значимыми оказались только содержание калия и фосфора (на уровне тенденции), что ставит вопрос о внесении калийных и фосфорных удобрений при посадке сеянцев. При дискретной обработке почвы с подготовкой микроповышений большое значение для роста высаженных сеянцев имеет высота насыпи, образующейся при обработке почвы. Вклад высоты отсыпанного микроповышения может перекрывать значение агротехнических параметров, связанных с обеспечением водно-физических и химических свойств почвы. Этот показатель связан с качеством работы оператора, проводящего обработку почвы.

Микроповышения, подготовленные экскаватором, по сравнению с пасекой обеспечивают лучший питательный режим в корнеобитаемом слое, но обладают повышенной рыхлостью и сниженной влажностью почвы, что может влиять на рост сеянцев. По комплексу свойств наиболее благоприятные условия для сеянцев ели, самые близкие к нативным условиям без обработки почвы, создаются в центральной части посадочного места. Это необходимо учитывать при получении лесных культур в ходе обработки почвы крупными микроповышениями.

В практическом отношении полученные результаты будут также полезны при прогнозировании роста посадочного материала в случае использования сходных технологий посредством экспресс-методов почвенных исследований, откроют перспективы дальнейших исследований по моделированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Сунгуров Р.В., Сунгурова Н.Р. Лесные культуры в северной подзоне тайги: моногр. Архангельск: Соломбал. тип., 2006. 144 с.
Babich N.A., Sungurov R.V., Sungurova N.R. *Forest Crops in the Northern Taiga Subzone*: Monograph. Arkhangelsk, Solombala Print. House, 2006. 144 p. (In Russ.).
2. Багаев С.С. Оценка состояния опытно-производственных культур ели, заложённых по разным технологиям // Лесохоз. информ. 2016. № 3. С. 123–137.
Bagaev S.S. Assessment of the Development of Industrial Spruce Crops Laid on Different Technologies. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2016, no. 3, pp. 123–137. (In Russ.).
3. Бартнев И.М. К вопросу создания лесных культур посадкой ПЗМК // Лесотехн. журн. 2013. № 2(10). С. 123–130.
Bartenev I.M. On the Issue of Creating Forest Crops by Planting Seedlings with a Closed Root System. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2013, no. 2(10), pp. 123–130. (In Russ.).
4. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. *Dynamics of Organic Matter Carbon Content in Middle Taiga Spruce Forests on Automorphic Soils*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2014. 270 p. (In Russ.).
5. Варфоломеев Л.А., Сунгуров Р.В. Почвенная экология лесных культур на Севере. Архангельск: СевНИИЛХ, 2007. 292 с.

Varfolomeev L.A., Sungurov R.V. *Soil Ecology of Forest Crops in the North*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry Publ., 2007. 292 p. (In Russ.).

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

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

7. Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.

Karpachevskij L.O. *Forest and Forest Soils*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 264 p. (In Russ.).

8. Касимов А.К., Итешина Н.М., Моличева Т.О. Агрохимические свойства посадочных мест в условиях механической обработки почвы на еловых вырубках Удмуртской республики // Аграрн. вестн. Урала. 2009. № 5(59). С. 89–92.

Kasimov A.K., Iteshina N.M., Molicheva T.O. Agrochemical Properties of Planting Sites in Conditions of Mechanical Tillage in Spruce Clearings of the Udmurt Republic. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2009, no. 5(59), pp. 89–92. (In Russ.).

9. Мерзленко М.Д. Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 22–30.

Merzlenko M.D. Relevant Aspects of Artificial Reforestation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 22–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.22>

10. Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Теория и практика выращивания сосны и ели в культурах. Архангельск: АГТУ, 2002. 220 с.

Merzlenko M.D., Babich N.A. *Theory and Practice of Growing Pine and Spruce in Crops*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2002. 220 p. (In Russ.).

11. Мочалов Б.А. Подготовка почвы и выбор посадочного места при создании лесных культур сосны из семян с закрытыми корнями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 4. С. 9–18.

Mochalov B.A. Soil Cultivation and Selection Planting Site Attached to Pine Artificial Stands Creation from Containerized Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 4, pp. 9–18. (In Russ.).

12. Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение. Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.

Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Soil Science*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2016. 146 p. (In Russ.).

13. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: АГТУ, 2007. 127 с.

Nakvasina E.N., Seryj V.S., Semenov B.A. *Field Workshop on Soil Science*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 127 p. (In Russ.).

14. Придача В.Б., Позднякова С.В., Сазонова Т.А. Влияние соотношений N : P : K в среде на минеральный состав растений рода *Betula* // Тр. КарНЦ РАН. 2012. № 2. С. 104–112.

Pridacha V.B., Pozdnyakova S.V., Sazonova T.A. Effect of Ambient N : P : K Ratios on the Mineral Nutrient Composition in *Betula* Plants. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2012, no. 2, pp. 104–112. (In Russ.).

15. Сазонова Т.А., Придача В.Б. Влияние почвенных условий среднетаежного сосняка лишайникового на рост и показатели минерального и водного режима сосны обыкновенной // Тр. КарНЦ РАН. 2020. № 11. С. 113–123.

Sazonova T.A., Pridacha V.B. The Effect of Soil Conditions on Growth and Parameters of the Mineral and Water Metabolism in Scots Pine in a Middle-Taiga Lichen-Type Pine Forest. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Transactions of

the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2020, no. 11, pp. 113–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb1316>

16. Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В., Гаевский Н.П. Анализ эффективности искусственного лесовосстановления и предложения по его улучшению // Уч. зап. ПетргГУ. 2014. Т. 1, № 8(145). С. 71–76.

Sungurova N.R., Sungurov R.V., Gaevskiy N.P. Analysis of Artificial Reforestation Efficiency and Suggestions on its Improvement. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* = Proceedings of Petrozavodsk State University, 2014, vol. 1, no. 8(145), pp. 71–76. (In Russ.).

17. Anderson M.J. A New Method for Non-Parametric Multivariate Analysis of Variance. *Austral Ecology*, 2001, vol. 26, iss. 1, pp. 32–46.

<https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>

18. Borcard D., Gillet F., Legendre P. *Numerical Ecology with R*: 2nd ed. New York, Springer Cham, 2018. 435 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71404-2>

19. Bowd E.J., Banks S.C., Strong C.L., Lindenmayer D.B. Long-Term Impacts of Wildfire and Logging on Forest Soils. *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, pp. 113–118.

<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0294-2>

20. Cambi M., Hoshika Y., Mariotti B., Paoletti E., Picchio R., Venanzi R., Marchi E. Compaction by a Forest Machine Affects Soil Quality and *Quercus robur* L. Seedling Performance in an Experimental Field. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 384, pp. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045>

21. Chaves Cardoso J., Burton P.J., Elkin C.M. A Disturbance Ecology Perspective on Silvicultural Site Preparation. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 12, art. no. 1278.

<https://doi.org/10.3390/f11121278>

22. Ding D., Arif M., Liu M., Li J., Hu X., Geng Q., Yin F., Li C. Plant-Soil Interactions and C:N:P Stoichiometric Homeostasis of Plant Organs in Riparian Plantation. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, art. no. 979023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.979023>

23. 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>

24. Heiskanen J., Rikala R. Root Growth and Nutrient Uptake of Norway Spruce Container Seedlings Planted in Mounded Boreal Forest Soil. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 222, iss. 1–3, pp. 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.047>

25. Heiskanen J., Saksa T., Luoranen J. Soil Preparation Method Affects Outplanting Success of Norway Spruce Container Seedlings on Till Soils Susceptible to Frost Heave. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 1, art. no. 893. <https://doi.org/10.14214/sf.893>

26. Holmström E., Gålnander H., Petersson M. Within-Site Variation in Seedling Survival in Norway Spruce Plantations. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 2, art. no. 181.

<https://doi.org/10.3390/f10020181>

27. Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P. Effects of Site Preparation Methods on Soil Physical Properties and Outplanting Success of Coniferous Seedlings in Boreal Forests. *Journal of Forestry Research*, 2024, vol. 35, art. no. 15.

<https://doi.org/10.1007/s11676-023-01671-w>

28. Ivanov Yu.V., Zlobin I.E., Kartashov A.V., Ivanova A.I., Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Kuznetsov V.V. Mineral Nutrition of Naturally Growing Scots Pine and Norway Spruce under Limited Water Supply. *Plants*, 2022, vol. 11, no. 19, art. no. 2652.

<https://doi.org/10.3390/plants11192652>

29. Knapp B.O., Wang G.G., Walker J.L. Relating the Survival and Growth of Planted Longleaf Pine Seedlings to Microsite Conditions Altered by Site Preparation Treatments. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, iss. 11, pp. 3768–3777.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.013>

30. Legendre P., Legendre L. *Numerical Ecology*: Third English Edition. The Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 2012. 990 p.
31. Lehtosalo M., Mäkelä A., Valkonen S. Regeneration and Tree Growth Dynamics of *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Regeneration Areas Treated with Spot Mounding in Southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 3, pp. 213–223. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.489514>
32. Liang M., Sugimoto A., Tei S., Bragin I.V., Takano S., Morozumi T., Shingubara R., Maximov T.C., Kiyashko S.I., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. Importance of Soil Moisture and N Availability to Larch Growth and Distribution in the Arctic Taiga-Tundra Boundary Ecosystem, Northeastern Siberia. *Polar Science*, 2014, vol. 8, iss. 4, pp. 327–341. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.07.008>
33. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>
34. Manly B.F.J. *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology*: 3rd Ed. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, 2007. 455 p.
35. Mc Carthy R., Rytter L., Hjelm K. Effects of Soil Preparation Methods and Plant Types on the Establishment of Poplars on Forest Land. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, art. no. 47. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0647-9>
36. McArdle B.H., Anderson M.J. Fitting Multivariate Models to Community Data: A Comment on Distance-Based Redundancy Analysis. *Ecology*, 2001, vol. 82, iss. 1, pp. 290–297. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0290:FMMTCD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0290:FMMTCD]2.0.CO;2)
37. Nilsson U., Luoranen J., Kolström T., Örländer G., Puttonen P. Reforestation with Planting in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 4, pp. 283–294. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.498384>
38. Nzokou P., Cregg B.M. Morphology and Foliar Chemistry of Containerized *Abies fraseri* (Pursh) Poir. Seedlings as Affected by Water Availability and Nutrition. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, art. no. 602. <https://doi.org/10.1051/forest/2010015>
39. Oksanen J., Simpson G.L., Blanchet F.G., Kindt R., Legendre P., Minchin P., O'Hara R.B., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H., Barbour M., Bedward M., Bolker B., Borcard D., Borman T., Carvalho G., Chirico M., De Caceres M., Durand S., Antoniazzi Evangelista H.B., FitzJohn R., Friendly M., Furneaux B., Hannigan G., Hill M.O., Lahti L., Martino C., McGlinn D., Ouellette M.-H., Ribeiro Cunha E., Smith T., Stier A., Ter Braak C.J.F., Weedon J. *Vegan: Community Ecology Package*: R package version 2.6-10, 2025. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed 01.02.25).
40. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland, Springer Cham, 2013. 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
41. Perumal M., Wasli M.E., Ying H.S., Lat J., Sani H. Soil Morphological and Physicochemical Properties at Reforestation Sites after Enrichment Planting of *Shorea macrophylla* in Sampadi Forest Reserve, Sarawak, Malaysia. *Borneo Journal of Resource Science and Technology*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 28–43. <https://doi.org/10.33736/bjrst.220.2015>
42. Saksa T., Heiskanen J., Miina J., Tuomola J., Kolström T. Multilevel Modelling of Height Growth in Young Norway Spruce Plantations in Southern Finland. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 1, pp. 143–153. <https://doi.org/10.14214/sf.403>
43. The R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*: Reference Index. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. 3893 p.
44. Wickham H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York, Springer Cham, 2016. 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*385

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-77-91

Особенности реакции старовозрастной сосны при осушении водораздельной территории в Республике Коми

В.В. Пахучий[✉], *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: KLD-8745-2024*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7530-308X>

Л.М. Пахучая, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID: KLE-3191-2024*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2096-3782>

Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Россия, 167982; pakhutchy@rambler.ru[✉], ljudmila-pahuchaja@rambler.ru

Поступила в редакцию 24.07.24 / Одобрена после рецензирования 18.10.24 / Принята к печати 21.10.24

Аннотация. Цель исследования определяется необходимостью изучения лесоводственной эффективности гидромелиорации на объектах со старовозрастными древостоями сосны в Республике Коми, где в настоящее время общая площадь осушения составляет около 100 тыс. га. Актуальность работы связана с тем, что в результате реализации планов по гидролесомелиорации в республике накопились значительные по размерам территории старовозрастных древостоев. На таких объектах в эксплуатационных лесах лесопромышленное направление осушения ориентировано на заготовку древесины. В то же время допускается сохранение осушаемых насаждений до возраста естественной спелости в защитных лесах, выполняющих санитарно-гигиенические и эстетические функции. При решении вопроса об альтернативных заготовке древесины вариантах использования таких древостоев целесообразна оценка их способности адаптироваться к водному режиму на осушаемых лесных землях. Исследовалась динамика радиального прироста старовозрастных деревьев сосны, расположенных на различном расстоянии от осушительных каналов. Прирост является достаточно объективным маркером реакции деревьев на изменение водного режима почв после осушения, как положительной, так и отрицательной. Установлено, что на водораздельной территории деревья старовозрастной сосны успешно адаптируются к изменению водного режима после осушения. Средний прирост старовозрастных деревьев сосны на межканальном пространстве становится максимальным в начале 5-го пятилетия после осушения. Согласно прогнозу, прирост достигнет значений, соответствующих приросту до осушения, к концу 12-го пятилетия. При прочих равных условиях в 1-е четыре пятилетия после осушения на межканальном пространстве между приростом и удалением деревьев от каналов наблюдается положительная связь, а с 5-го пятилетия восстанавливается типичная для осушаемых насаждений отрицательная связь между этими характеристиками. Последнее свидетельствует об успешной адаптации к условиям после осушения на водораздельной территории не только отдельных старовозрастных деревьев сосны, но и их совокупности на межканальном пространстве на объекте гидромелиорации.

Ключевые слова: Республика Коми, гидролесомелиорация, сосна, радиальный прирост сосны, связь прироста деревьев и их удаления от канала

Для цитирования: Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Особенности реакции старовозрастной сосны при осушении водораздельной территории в Республике Коми // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 77–91. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-77-91>

Original article

Peculiarities of the Response of Old-Growth Pine to Drainage of a Watershed Area in the Komi Republic

Vladimir V. Pakhuchij[✉], Doctor of Agriculture, Professor; ResearcherID: [KLD-8745-2024](https://orcid.org/0000-0001-7530-308X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7530-308X>

Ludmila M. Pakhuchaya, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [KLE-3191-2024](https://orcid.org/0000-0002-2096-3782), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2096-3782>

Syktvykar Forest Institute – Branch of the Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, ul. Lenina, 39, Syktvykar, 167982, Russian Federation; pakhutchy@rambler.ru[✉], ljudmila-pahuchaja@rambler.ru

Received on July 24, 2024 / Approved after reviewing on October 18, 2024 / Accepted on October 21, 2024

Abstract. The aim of the study is determined by the need to study the silvicultural efficiency of hydromelioration at sites with old-growth pine stands in the Komi Republic, where the total drainage area currently amounts to approximately 100 thousand ha. The relevance of this work is related to the fact that as a result of the implementation of hydromelioration plans, significant areas of old-growth stands have accumulated in the republic. At such sites in commercial forests, the forest industry drainage field is focused on timber harvesting. At the same time, it is permissible to preserve drained stands up to the age of natural maturity in protective forests that perform sanitary, hygienic and aesthetic functions. When deciding on alternative options for using such stands for timber harvesting, it is advisable to assess their ability to adapt to the water regime on drained forest lands. The dynamics of radial increment of old-growth pine trees located at different distances from drainage channels has been studied. The increment is a fairly objective marker of the response of trees to changes in the water regime of soils after drainage, both positive and negative. It has been established that old-growth pine trees in the watershed area successfully adapt to changes in the water regime after drainage. The average increment in the old-growth pine trees in the inter-channel space reaches its maximum at the beginning of the 5th five-year period after drainage. According to the forecast, the increment will reach values corresponding to the increment before drainage by the end of the 12th five-year period. All other things being equal, in the first 4 five-year periods after drainage in the inter-channel space, a positive relationship is observed between the increment and the distance of trees from the channels, and from the 5th five-year period, the negative relationship between these characteristics, typical for drained stands, is restored. The latter indicates the successful adaptation to the conditions after drainage in the watershed area not only of individual old-growth pine trees, but also of their totality in the inter-channel space at the hydromelioration site.

Keywords: the Komi Republic, forest hydromelioration, pine, radial increment of pine, the relationship between the increment of trees and their distance from the channel

For citation: Pakhuchij V.V., Pakhuchaya L.M. Peculiarities of the Response of Old-Growth Pine to Drainage of a Watershed Area in the Komi Republic. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 77–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-77-91>



Введение

В настоящее время в регионах Европейского Севера России общая площадь осушения превышает миллион гектаров [3], в т. ч. в Республике Коми составляет около 100 тыс. га. Молодняки, средневозрастные, приспевающие и спелые древостои занимают 8,6; 12,6; 6,7; 9,7 % соответственно, а древостои VII и более высокого классов возраста – 62,4 % от площади целесообразного для осушения гидролесомелиоративного фонда. Таким образом, доля спелых и перестойных насаждений в гидролесомелиоративном фонде в Республике Коми равняется 72,1 % [20].

Тем не менее, около 1/2 площади гидролесомелиоративного фонда относится к I–II группам эффективности осушения, что указывает на лесоводственную обоснованность этого решения.

В отношении хозяйственных мероприятий в таких древостоях есть различные точки зрения. Лесопромышленное направление осушения ориентирует, прежде всего, на заготовку древесины на данных объектах. При этом обязателен учет специфичности технологии рубок на осушаемых лесных землях [7, 21]. Рекомендуются насаждения любого возраста считать первоочередными объектами лесопользования на осушаемых землях, если они достигли показателей, позволяющих сделать заготовку древесины в них экономически целесообразной. Существует мнение, что в условиях, когда по ряду причин ремонт осушительных систем на тысячах гектаров невозможен, отставание в сроках при осуществлении рубок может привести к потере накопленного дополнительного прироста в результате его перехода в отпад [4, 25]. Тем не менее, при этом допускается сохранение осушаемых насаждений до возраста естественной спелости в защитных лесах, выполняющих санитарно-гигиенические и эстетические функции. Возрасты спелости осушаемых древостоев – это важный вопрос лесопользования [21]. Однако необходим поиск ответа на вопрос о возрасте семенной возобновительной спелости 60–70-летних хвойных древостоев, рекомендуемых к рубке. Следует отметить, что оценки влияния осушения на урожайность семян хвойных пород единичны, но свидетельствуют о стимуляции семенной продуктивности осушением [2]. Косвенным показателем положительного влияния осушения на урожайность семян может быть значительное увеличение густоты подроста вблизи каналов, появившегося после осушения, в т. ч. подроста кедра сибирского – породы, включенной в Красную книгу Республики Коми [14].

Обычно при изучении лесоводственной эффективности гидромелиорации подчеркивается положительная реакция хвойных древостоев на осушение. Возможны указания на слабую реакцию насаждений в 1-е годы после строительства осушительных систем [12, 22] или на снижение прироста до значений более низких, чем до осушения [26, 27]. Для условий Среднего Урала особенности реакции сосновых древостоев – уменьшение радиального прироста сосны в 1-е пятилетие после строительства осушительной системы – авторы объясняют приспособлением насаждения к изменению комплекса водно-физических и агрохимических свойств торфяных горизонтов в условиях экстенсивного осушения и перестройкой ассимиляционного аппарата и корневых систем [19]. Адаптация древостоев после осушения рассматривается как специфиче-

ский этап в их последующем формировании, отмечается меньшая продолжительность этапа на участках вблизи каналов по сравнению с межканальным пространством [22]. Подчеркивается актуальность региональных исследований процессов адаптации сосны обыкновенной на осушаемых землях к современным климатическим условиям [9, 12].

Для старовозрастных древостоев обнаружена более слабая реакция на регулирование водного режима методами гидротехнических мелиораций. В то же время приводятся примеры «омолаживающей» роли осушения применительно к древостою, произраставшему на болоте, задерживавшемуся в росте до 80–90 лет, но после осушения формирующему прирост, необычный для древостоев в условиях нормального естественного дренирования почв [5].

По данным исследований на объектах гидролесомелиорации, расположенных в крайних восточных районах Республики Коми и представленных темнохвойными насаждениями с участием в их составе кедра сибирского [15, 16], отмечается несоответствие реакции старовозрастного кедра на осушение общепринятым представлениям о характере изменения прироста на межканальном пространстве. Авторы объясняют это адаптацией древостоев к смене водного режима почв в 1-е пятилетия после осушения и указывают на целесообразность изучения данного вопроса, имеющего как практическое, так и теоретическое значение.

В этой работе приведены результаты изучения изменения прироста старовозрастной сосны на объекте гидромелиорации в Республике Коми в связи с таксационными характеристиками отдельных деревьев и их совокупности, удалением деревьев от осушительных каналов и продолжительностью влияния осушения. Актуальность исследования определяется важностью изучения способности древесных растений адаптироваться к изменению водного режима, как в условиях естественно дренированных почв, например вследствие изменения климата или антропогенного и техногенного воздействий, так и на объектах осушительной гидромелиорации, в т. ч. с древостоями высокого возраста. Результаты научной работы могут быть также полезны при решении вопроса о возможности использования старовозрастных древостоев для целей, альтернативных их рубке для заготовки древесины.

Объекты и методы исследования

Как отмечено выше, выбор объектов исследования объясняется тем, что на объектах гидромелиорации в Республике Коми накопились большие площади старовозрастных древостоев. Учитывалось также высокое участие в составе гидролесомелиоративного фонда насаждений с преобладанием сосны (около 2/3 лесопокрытой площади) и то, что заболоченные территории в республике представлены в основном водораздельными пространствами.

Исследование выполнено в 2021 г. в Корткеросском районе Республики Коми на водоразделе р. Вычегда и Кия-Ю на участке, мелиорированном в 1976 г. Расстояние между каналами – 140 м. Глубина каналов – 0,6–1,0 м. При проведении научных изысканий использовали общепринятые в таксации, лесоводстве и гидролесомелиорации методы [3, 8, 11]. Характеристика насаждений на объекте исследования приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика насаждений на объекте исследования
The characteristics of stands at the research site

Пробная площадь / мощность торфа, м	Расстояние от центра до ближнего канала, м	Состав яруса	Высота яруса, м	Относительная полнота яруса	Запас насаждения, м ³ /га	Класс возраста	Тип леса
25/0,4	18	10С ед.Е, ед.Б	12,3	0,9	155	X	С. б.-сф.
26/0,4	44		10,6	0,9	130	IX	
27/0,3	70		9,3	1,0	130	VIII	С. к.-сф.

Примечание: С. б.-сф. – сосняк багульниково-сфагновый; С. к.-сф. – сосняк кустарничково-сфагновый. Для всех насаждений класс бонитета по шкале М.М. Орлова – Va.

На участке межканального пространства, ограниченном пробными площадями 25–27, у учетных деревьев измерили высоту, диаметр на высоте 1,3 м и расстояние от них до ближнего канала. Совокупность использованных учетных деревьев превышает объем малой выборки (30 ед.), а их распределение на части межканального пространства, представленного 3 пробными площадями, характеризуется отсутствием достоверной связи между возрастом деревьев и их удалением от каналов.

При изучении реакции сосны на осушение использовали радиальный прирост. Известно, что около 70–80 % вариации ширины годовых колец деревьев во влажных условиях произрастания и 90 % в сухих может быть объяснено изменчивостью водного режима [36]. В значительной степени именно это обстоятельство определяет использование радиального прироста при изучении отклика древесных растений на климатические изменения, техногенное и антропогенное воздействия [9, 11, 12, 18], в т. ч. при гидролесомелиорации [19, 22, 31].

У учетных деревьев на высоте 1,3 м были взяты керны для последующего анализа [3, 11, 27]. Для оценки реакции сосны на осушение использовали текущий периодический (по пятилетиям) радиальный прирост до и после осушения (далее – прирост).

Общее количество годовых колец по керну, взятому на высоте груди, принимали в качестве показателя – «возраст на высоте груди» – «brest height age» [29, 35] (далее – возраст дерева). При необходимости возможно прямое определение возраста подроста до высоты 1,3 м [28].

Радиальный прирост измеряли микроскопом МБС-10 для периода, предшествовавшего осушению – с 1972 до 1976 г., и для периода после осушения – с 1977 до 2021 г. Ошибка определения среднего прироста – 0,01–0,02 см. Точность опыта изменяется от 5,6 до 12,5 %.

При оценке влияния возраста деревьев на прирост при переходе от пятилетнего периода 2017–2021 гг. к периоду 1977–1981 гг. для каждого последующего пятилетия возраст деревьев уменьшали на 5 лет. Время, прошедшее после осушения, для 1–9-го пятилетий после осушения приняли соответствующим серединам пятилетних периодов, прошедших после строительства осушительной сети, т. е. 3–43 годам.

При обработке и анализе полученных данных использовали электронные таблицы Excel и программный пакет Statistica.

Результаты исследования и их обсуждение

На объекте исследования произрастают простые по форме насаждения с абсолютным преобладанием в их составе сосны. Диаметр учетных деревьев изменяется от 13,5 до 33,1 см, высота – от 11 до 17,5 м, а возраст – от 123 до 215 лет (табл. 2).

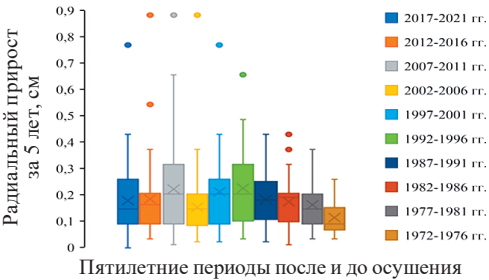
Таблица 2

Характеристики учетных деревьев сосны и их удаление от канала
The characteristics of the registered pine trees and their distance from the channel

Дерево	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	Дерево	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>T</i>	<i>L</i>
1	19,7	15,0	132	5,6	24	24,8	13,5	159	19,6
2	16,2	12,0	130	10,0	25	24,2	14,0	137	14,1
3	21,0	13,0	137	2,6	26	21,3	13,0	180	20,1
4	32,0	17,0	161	2,0	27	17,3	13,5	135	20,7
5	14,6	11,0	123	4,0	28	18,5	13,0	200	15,6
6	13,5	11,0	147	5,2	29	24,4	15,5	191	18,2
7	33,1	16,0	192	5,0	30	24,3	15,5	166	16,3
8	14,8	16,5	215	7,0	31	20,2	14,0	203	17,1
9	21,7	17,0	162	5,0	32	25,0	13,5	180	15,2
10	24,0	14,0	163	5,0	33	19,0	14,0	164	17,6
11	19,5	13,0	186	8,0	34	23,5	14,0	165	15,9
12	19,0	12,0	174	12,7	35	20,6	13,0	174	15,5
13	16,5	12,0	157	12,0	36	20,4	15,0	147	25,0
14	20,7	12,5	134	10,0	37	21,8	14,5	173	26,0
15	26,2	14,0	170	8,0	38	26,1	14,0	204	27,0
16	26,6	15,0	187	10,0	39	24,4	13,0	195	32,0
17	20,9	13,0	159	8,0	40	22,6	17,5	200	41,1
18	22,0	15,5	167	8,5	41	22,6	15,0	179	42,9
19	27,7	15,0	158	8,2	42	26,5	14,5	176	44,1
20	24,4	13,0	166	10,0	43	16,3	12,0	167	49,3
21	15,3	13,0	139	13,5	44	21,7	13,5	179	53,0
22	22,2	13,5	173	17,0	45	25,3	13,0	172	61,4
23	21,5	14,5	170	13,5	46	19,8	13,0	162	68,7

Примечание: *D* – диаметр в коре (см) на высоте 1,3 м в 2021 г.; *H* – высота (м) в 2021 г.; *T* – количество годовичных колец на высоте 1,3 м в 2021 г.; *L* – расстояние до ближнего канала (м).

Фактическая асимметрия для выборок данных показателей (от +0,42 до –0,06) и эксцесса (от +0,51 до –0,37) меньше критических значений этих показателей, соответствующих 0,56 и 0,85 для 5%-го уровня значимости, что указывает на соответствие распределения нормальному и, видимо, связано с отсутствием в выборках, представленных старовозрастными деревьями, тонкомерной части древостоя (см. рисунок, табл. 3).



Радиальный периодический (за 5 лет, см) прирост сосны после (1977–2021 гг.) и до осушения (1972–1976 гг.). Среднее – ×; точки выброса – •
The radial periodic (over 5 years, cm) increment of pine trees after (1977–2021) and before (1972–1976) drainage. Mean – ×; outliers – •

Таблица 3

Средние вариации характеристик учетных деревьев сосны и периодического радиального прироста за 5 лет
The average variations in the characteristics of the registered pine trees and periodic radial increment over 5 years

Описатель- ные стати- стики	D	H	T	L	Периодический радиальный прирост (см) за годы									
					2017– 2021	2012– 2016	2007– 2011	2002– 2006	1997– 2001	1992– 1996	1987– 1991	1982– 1986	1977– 1981	1972– 1976
X	21,80	13,90	168,00	18,9	0,190	0,180	0,220	0,160	0,210	0,220	0,180	0,170	0,160	0,120
min	13,50	11,00	123,00	2,0	0,020	0,050	0,030	0,040	0,040	0,050	0,040	0,030	0,050	0,050
max	33,10	17,50	215,00	68,7	0,700	0,800	0,800	0,800	0,700	0,600	0,400	0,400	0,350	0,250
σ^2	17,64	2,25	472,20	253,1	0,013	0,017	0,021	0,014	0,014	0,014	0,008	0,007	0,006	0,003
σ	4,20	1,50	21,73	15,9	0,116	0,132	0,146	0,117	0,119	0,117	0,088	0,085	0,075	0,053
V	19,30	10,80	13,00	84,4	65,100	71,700	67,400	75,000	57,400	53,100	48,500	48,900	45,700	44,000
m	0,62	0,22	3,20	2,4	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,010	0,010	0,010	0,010
As	0,31	0,42	-0,06	1,6	2,130	2,650	1,770	3,810	1,560	0,810	0,570	0,570	0,560	0,750
Ex	0,51	0,04	-0,37	2,0	8,050	10,180	4,950	20,150	5,060	1,140	0,120	0,120	-0,320	-0,220

Примечание: X – среднее; σ^2 – дисперсия; σ – стандартное отклонение; V – коэффициент вариации, %; m – стандартная ошибка среднего; As – асимметрия; Ex – эксцесс.

Согласно полученным при измерении радиального прироста сведениям, возможна оценка индивидуальной реакции на осушение 46 учетных деревьев в течение 9 пятилетних периодов, т. е. для 414 таких периодов. Для 337 пятилетних периодов, или в 81 % случаев, прирост после осушения превышал показатель до осушения или был равен ему. Это согласуется с традиционным представлением о роли гидролесомелиорации в лесоводственных системах [1, 3, 5, 6, 14–17, 19, 22, 23, 39].

Для 77 периодов, или 19 % случаев, прирост в отдельные пятилетия был меньше, чем до осушения, что также отмечается в [19, 26, 27]. Уменьшение прироста в 1-е пятилетие после осушения зафиксировано менее чем в 2 % случаев. В последующие за такими пятилетиями периоды наблюдается увеличение прироста или его флуктуация со знаком (+) или (–) относительно прироста до осушения. То есть старовозрастные деревья в основном успешно адаптируются к лесорастительным условиям, формирующимся после осушения.

При описании изменения радиального прироста совокупности деревьев дифференцированно по периодам после осушения в качестве факторов, влияющих на прирост, использовали удаление деревьев от ближнего канала, косвенно характеризующее интенсивность осушения, и возраст учетных деревьев, в значительной степени определяющий их размерные характеристики. Последнее подтверждается наличием достоверной связи между возрас-

том и диаметром на высоте груди, возрастом и высотой учетных деревьев, их возрастом и диаметром ($R = 0,31-0,53$; $R_{0,05} = 0,29$). В то же время связь между удалением учетных деревьев от каналов и их возрастом недостоверна ($R = 0,24$; $R_{0,05} = 0,29$). Это позволяет использовать данные показатели в качестве независимых переменных в уравнениях множественной регрессии (табл. 4).

Таблица 4

Характеристики зависимости радиального периодического прироста сосны за 5 лет (Y) от удаления деревьев от канала и возраста деревьев на высоте груди
The characteristics of the dependence of radial periodic increment of pine over 5 years (Y) on the distance of trees from the channel and the age of trees at breast height

Период, гг.	A	B	C	R^2	R	$F_{\text{факт.}}(2,43)$	$F_{\text{табл.}}$	$p <$
2021–2017	–0,001143	–0,001019	+0,37	0,076	0,28	1,76	$F_{0,01} = 5,1$	0,184
2016–2012	–0,001524	–0,001832	+0,51	0,152	0,39	3,87		0,029
2011–2007	–0,001404	–0,002643	+0,66	0,207	0,46	5,62	$F_{0,05} = 3,2$	0,007
2006–2002	–0,000579	–0,001406	+0,38	0,084	0,29	1,97		0,152
2001–1997	–0,000923	–0,001919	+0,51	0,157	0,40	4,03	$F_{0,10} = 2,4$	0,025
1996–1992	+0,000279	–0,002399	+0,56	0,192	0,44	5,12		0,010
1991–1987	+0,000678	–0,001466	+0,37	0,125	0,35	3,07	$F_{0,25} = 1,4$	0,057
1986–1982	+0,000662	–0,001548	+0,38	0,147	0,38	3,71		0,033
1981–1977	+0,000707	–0,001026	+0,28	0,089	0,30	2,10		0,135

Примечание: A , B , C – коэффициенты уравнения $Y = AL + BT + C$; количество выборки – 46.

Анализ данных табл. 4 показывает, что для всех пятилетних периодов рассматриваемая связь достоверна на уровне значимости от 1 до 25 %. Регрессия прироста по возрасту учетных деревьев во всех случаях отрицательная. Это согласуется с одним из основных положений гидролесомелиорации о том, что более молодые деревья отзывчивее на регулирование водного режима. Однако в данном случае приведенный факт говорит о сохранении такого направления связи при сравнении реакции на осушение деревьев высокого возраста, относящихся в основном к возрастным группам «спелые и перестойные древостои». Диапазон изменчивости возраста учетных деревьев в 1-е пятилетие после осушения (1977–1981 гг.) составлял 78–170 лет, а в период обмера и взятия кернов (2021 г.) – 123–215 лет.

Регрессия прироста по расстоянию до канала в 1-е четыре пятилетия после осушения положительная. То есть радиальный прирост увеличивается при удалении от каналов. Это противоречит базовому положению гидролесомелиорации, согласно которому вблизи каналов прирост должен быть больше, чем в середине межканального пространства. Положительная направленность связи между приростами и удалением от каналов на объектах лесосушки отмечалась для сосновых молодняков [5]. К аналогичным результатам может привести деятельность бобров [6, 23], вторичное заболачивание осушаемого участка или отличие таксационных показателей сравниваемых учетных деревьев и древостоев. В данном случае первые 3 причины исключаются, а отличие деревьев по возрасту заложено в модель введением этого показателя в уравнения связи между рассматриваемыми характеристиками.

Направление связи между ростом деревьев и удалением от каналов может зависеть от характера изменения мощности торфа на межканальном пространстве, если на объекте исследования торфяная залежь мелкая, т. е. менее 1 м.

В связи с этим следует отметить, что на части межканального пространства с пробными площадями 25–27 мощность торфа уменьшается от каналов к середине межканального пространства. Это должно было усиливать отрицательную связь между приростом и удалением деревьев от каналов, а не ослаблять ее, и тем более – не изменять на противоположную.

В исследованиях слабая реакция на осушение в 1-е годы после проведения данного мероприятия обычно связывается с адаптацией деревьев к новому водному режиму [9, 19, 22, 26]. Возможность изменения направления связи на соответствующее базовым представлениям гидролесомелиорации по истечении периода адаптации была показана на основе изучения реакции на осушение старовозрастного кедра [15, 16]. Данные табл. 4 подтверждают правомерность такого прогноза. С 5-го по 9-е пятилетие после осушения коэффициенты регрессии прироста по расстоянию до канала становятся отрицательными. Таким образом, направление связи согласуется с представлением о роли каналов в создании благоприятных условий для роста древесных растений на межканальном пространстве.

Между коэффициентом A в уравнениях множественной регрессии и временем, прошедшим после осушения (P , лет), установлена тесная достоверная связь:

$$A = -6E - 0,05P + 0,0011 \quad (R = 0,92; R_{0,01} = 0,87).$$

Приравняв в этом уравнении коэффициент A к 0 и решая уравнение относительно периода времени, прошедшего после осушения, находим, что переход через нулевое значение коэффициента регрессии прироста по расстоянию до осушителя происходит через 18,3 лет после строительства осушительной сети.

Несмотря на установленное в 1-е после осушения пятилетия несоответствие направления связи между приростом деревьев и их удалением от канала базовому положению гидролесомелиорации, для всех пятилетних периодов после осушения средний прирост (0,16–0,22 см) больше, чем до осушения (0,12 см). То есть реакция совокупности старовозрастных деревьев сосны на осушение в течение всего периода после осушения положительная. Изменение среднего прироста (ZR , см) за время после осушения может быть описано полиномом второй степени:

$$ZR = -7E - 0,5P^2 + 0,0036P + 0,154 \quad (R = 0,52; R_{0,10} = 0,58).$$

Связь характеризуется как средняя по тесноте, достоверная на уровне значимости, близком к 10 %. Стандартные расчеты позволяют установить координаты вершины параболы, описывающей эту связь: $P = 25,7$ лет; $ZR = 0,20$ см. Выравненный средний периодический прирост достигает наибольшего значения (0,20 см) в начале 6-го пятилетнего периода после осушения. Это согласуется с указанием на то, что в северных районах при ориентировании на лесопромышленное освоение гидролесомелиоративного фонда в виде заготовки древесины в спелых и перестойных насаждениях полная относительная реакция древостоев на регулирование водного режима наступает через 20–30 лет после строительства осушительных систем [17].

Максимальные приросты, как и средние, после осушения (0,35–0,80 см) также больше, чем до осушения (0,25 см). Минимальные приросты (0,02–0,05 см) могут соответствовать минимальному приросту до осушения (0,05 см) или быть меньше. Это обуславливает возрастание изменчивости показателя с 44 % перед осушением до 46–75 % после.

При объяснении несоответствия направления связи между приростом и удалением от каналов в 1-е пятилетия после осушения, в соответствии с общепринятым представлением, можно допустить, что наряду с положительным влиянием на рост сосны опускание уровней почвенно-грунтовых вод после строительства осушительной сети одновременно вызывает у деревьев стрессовое состояние, более выраженное вблизи канала и менее – на удалении от него, где уровни воды после осушения опустились на меньшую по сравнению с приканальным участком глубину. Кроме этого, требуется адаптация, а возможно, и восстановление корневых систем вблизи каналов [34, 36]. Итогом этого разнонаправленного влияния в 1-е годы после осушения является большее снижение прироста вблизи каналов и меньшее – на середине межканального пространства. После 4 пятилетий адаптации у деревьев вблизи канала сокращение прироста, связанное со стрессовым состоянием деревьев, замедляется или останавливается, прирост здесь увеличивается, и направление связи между рассматриваемыми показателями на межканальном пространстве начинает соответствовать базовым положениям гидrolесомелиорации.

Учет установленной трансформации направления связи на межканальном пространстве важен для правильной оценки роли гидrolесомелиорации в создании условий, благоприятных для роста леса на участках с избыточным увлажнением. В противном случае на примере старовозрастных древостоев возможно отрицание положительной роли осушения вплоть до рекомендаций по отказу от данного мероприятия. Восстановление с течением времени отрицательного направления связи между приростом деревьев и их удалением от канала можно рассматривать в качестве комплексной характеристики адаптации старовозрастных деревьев сосны к лесорастительным условиям после осушения, включающей не только собственно изменение прироста, но и пространственную (удаление от каналов) и временную (период после осушения) составляющие.

Исследование показывает, что для полной оценки длительности адаптации старовозрастных деревьев и древостоев требуется продолжительный период. В связи с этим оправдан интерес к проведению научных работ на объектах с длительным осушением по широкому спектру вопросов, в т. ч. влиянию на рост леса [3, 13, 30–33, 37–39].

Установленное изменение направленности связи не вызвано отличиями погодных или климатических условий, различием насаждений или почвогрунта, ремонтом осушительной сети или другими внешними воздействиями на древостой. По нашему мнению, она отражает различие продолжительности периода адаптации старовозрастных деревьев к смене лесорастительных условий вблизи каналов и на удалении от них.

Результаты исследования [17] свидетельствуют о высоком адаптационном потенциале осушаемых старовозрастных сосняков сфагновой группы типов леса на водораздельных территориях и позволяют допустить, что в случае невозможности проведения рубки таких древостоев они длительный период времени могут служить целям комплексного и многоцелевого применения в качестве потенциальных объектов рекреации, отдыха, туризма, охоты, временных лесосеменных участков и др.

В работе [8] рассмотрены особенности динамики линейного прироста сосны. При использовании производных от этого показателя характеристик, на-

пример прироста по площади поперечного сечения или объему, видимо, могут быть получены отличающиеся оценки. Следует также учитывать, что радиальный прирост – это удобный и относительно просто определяемый показатель, но, однако, только маркер изменения прироста деревьев и древостоев после осушения. Поэтому при поиске причинно-следственных связей, обуславливающих эти изменения в связи с гидромелиорацией, требуются комплексные эколого-физиологические исследования [10, 24, 36].

Выводы

1. У старовозрастных деревьев сосны в 81 % случаев периодический (по пятилетиям) радиальный прирост после осушения превышает прирост до осушения или равен ему, а в 19 % случаев – меньше прироста до осушения. В 1-е пятилетие после осушения уменьшение прироста до величины, которая ниже, чем прирост до осушения, отмечено в 2 % случаев – отдельные деревья старовозрастной сосны в сосняке сфагновой группы типов леса на водораздельной территории в основном успешно адаптируются к изменению условий роста после осушения.

2. Для совокупности старовозрастных деревьев сосны больший прирост наблюдается у деревьев меньшего возраста. В начале 6-го пятилетия выравненный средний прирост совокупности старовозрастных деревьев на межканальном пространстве достигает максимальных значений (0,20 см) и начинает уменьшаться. Согласно прогнозу, прирост достигнет среднего, соответствующего показателю до осушения (0,12 см), к концу 12-го пятилетия после изменения водного режима.

3. Максимальные приросты старовозрастных деревьев на межканальном пространстве (0,35–0,80 см) больше, чем до осушения (0,25 см). Минимальные значения (0,02–0,05 см) соответствуют минимальному приросту до мелиоративных мероприятий (0,05 см) или меньше него. Это обуславливает увеличение коэффициента вариации с 44 % перед осушением до 46–75 % после.

4. При прочих равных условиях в 1-е четыре пятилетия после осушения на межканальном пространстве прирост старовозрастных деревьев сосны увеличивается при удалении от каналов к середине межканального пространства, а с 5-го пятилетия до настоящего времени – при приближении к каналам. Восстановление с течением времени отрицательного направления связи между приростом деревьев и их удалением от канала можно рассматривать в качестве комплексной характеристики адаптации совокупности старовозрастных деревьев сосны к лесорастительным условиям после осушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабиков Б.В., Субота М.Б. Гидромелиорация в лесном хозяйстве: история научных исследований // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 103–118.

Babikov B.V., Subota M.B. Hydromelioration in Forestry: History of Research. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 103–118. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-103-118>

2. Басов В.А. Семенная продуктивность ельников и сосняков на Европейском Севере после гидролесомелиоративных работ // Эффективность и организация работ по

осушению лесных земель в Коми АССР: тез. докл. к совещ. Сыктывкар: ИБ КНЦ УрО РАН, 1988. С. 38–39.

Basov V.A. Seed Productivity of Spruce and Pine Forests in the European North after Hydroforestry Reclamation Works. *Efficiency and Organization of Work on Drainage of Forest Lands in the Komi ASSR: Abstracts from the Meeting*. Syktyvkar, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1988, pp. 38–39. (In Russ.).

3. Богданов А.П., Цветков И.В., Карабан А.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В. Исследования радиального прироста хвойных древостоев на объектах длительного наблюдения под влиянием осушения // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. № 9(49). 6 с.

Bogdanov A.P., Tsvetkov I.V., Karaban A.A., Paramonov A.A., Tretyakov S.V. Studies of Radial Growth of Coniferous Stands on Long-Term Observation Sites under the Influence of Drainage. *Journal of Agriculture and Environment*, 2024, no. 9(49). 6 p. (In Russ.).

<https://doi.org/10.60797/JAE.2024.49.5>

4. Великанов Г.Б., Константинов В.К., Порошин А.А., Чикалюк В.Ф. К вопросу о повышении эффективности использования осушаемых лесов // Лесопользование и гидrolесомелиорация: материалы Всерос. симпозиума. Вологда: СевНИИЛХ, 2007. Ч. 2. С. 19–28.

Velikanov G.B., Konstantinov V.K., Poroshin A.A., Chikalyuk V.F. On the Issue of Increasing the Efficiency of Using Drained Forests. *Lesopol'zovanie i melioratsiya: Proceedings of the All-Russian Symposium*. Vologda, Northern Research Institute of Forestry, 2007, part 2, pp. 19–28. (In Russ.).

5. Вомперский С.Э. Биологические основы эффективности лесосушения. М.: Наука, 1968. 310 с.

Vomperskij S.E. *Biological Principles of Forest Drainage Efficiency*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 310 p. (In Russ.).

6. Драндина А.Н. Влияние осушения на водный и пищевой режим торфяных почв и рост леса: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб, 2013. 20 с.

Drandina A.N. *The Influence of Drainage on the Water and Nutritional Regime of Peat Soils and Forest Growth*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. St. Petersburg, 2013. 20 p. (In Russ.).

7. Дружинин Н.А. Рубки главного пользования в осушаемых лесах // Лесопользование и гидrolесомелиорация: материалы Всерос. симп. Вологда: СевНИИЛХ, 2007. Ч. 1. С. 28–32.

Druzhinin N.A. Final Felling in Drained Forests. *Lesopol'zovanie i melioratsiya: Proceedings of the All-Russian Symposium*. Vologda, Northern Research Institute of Forestry, 2007, part 1, pp. 28–32. (In Russ.).

8. Евдокимов В.Н., Феклистов П.А. Использование связи между линейным и объемным годичным приростом // Изв. вузов. Лесн. журн. 1979. № 6. С. 20–23.

Evdokimov V.N., Feklistov P.A. Using the Relationship between Linear and Volumetric Annual Growth. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1979, no. 6, pp. 20–23. (In Russ.).

9. Железнова О.С., Тобратов С.А. Влияние климата на радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в различных местообитаниях Мещерской низменности // Изв. РАН. Сер.: Географич. 2019. № 5. С. 67–77.

Zheleznova O.S., Tobratov S.A. Influence of Climate on Radial Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Different Habitats of Meshchera Lowland. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2019, no. 5, pp. 67–77. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019567-77>

10. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Эколого-физиологическая оценка эффективности гидромелиорации в сосняках и ельниках на гидроморфных почвах // Лесопользование и гидrolесомелиорация: материалы Всерос. симп. Вологда: СевНИИЛХ, 2007. Ч. 2. С. 13–18.

Zarubina L.V., Konovalov V.N. Ecological and Physiological Assessment of the Effectiveness of Hydromelioration in Pine and Spruce Forests on Hydromorphic Soils. *Lesopol'zovanie i melioratsiya*: Proceedings of the All-Russian Symposium. Vologda, Northern Research Institute of Forestry, 2007, part 2, pp. 13–18. (In Russ.).

11. Кутявин И.Н., Манов А.В. Дендроклиматический анализ радиального прироста сосны (*Pinus sylvestris* L.) на европейском северо-востоке России // Изв. РАН. Сер.: Географич., 2022. Т. 86, № 4. С. 547–562.

Kutyavin I.N., Manov A.V. Dendroclimatic Analysis of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Radial Growth in the European North-East of Russia. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 4, pp. 547–562. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S2587556622040070>

12. Матюшевская Е.В., Киселев В.Н., Яротов А.Е. Адаптация сосны (*Pinus sylvestris*) к современным экологическим реалиям в Белорусском Полесье // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2020. № 4. С. 10–18.

Matyushevskaya E.V., Kiselev V.N., Yarotov A.E. Adaptation of Pine (*Pinus sylvestris*) to Modern Ecological Realities in the Belarusian Polesie. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* = Journal of the Belarusian State University. Ecology, 2020, no. 4, pp. 10–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-4-10-18>

13. Наквасина Е.Н., Цветков И.В., Давыдов А.В., Корсакова А.О. Трансформация сосняка кустарничково-сфагнового при длительном осушении в северном лесном районе // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2024. Вып. 250. С. 98–115.

Nakvasina E.N., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Korsakova A.O. Transformation of Shrub-Sphagnum Pine under Prolonged Drainage in the Northern Forest Area. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2024, iss. 250, pp. 98–115. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.250.98-115>

14. Пахучая Л.М. Лесоводственная эффективность гидромелиорации темнохвойных с участием кедра сибирского насаждений на крайнем северо-востоке европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 4. С. 7–11.

Pakhuchaya L.M. Silvicultural Efficiency of Soil Improvement in Dark Coniferous Stands with Siberian Cedar in the High Northeast of Russian European Part. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 4, pp. 7–11. (In Russ.).

15. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Влияние осушения на величину радиального прироста кедра сибирского // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы 6-й Всерос. конф. Петрозаводск: ПетрГУ, 2020. С. 110–111.

Pakhuchij V.V., Pakhuchaya L.M. The Effect of Drainage on the Radial Increment of Siberian Cedar. *Improving the Efficiency of the Forestry Complex*: Proceedings of the 6th All-Russian Conference. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2020, pp. 110–111. (In Russ.).

16. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Многофакторная модель изменения радиального прироста кедра сибирского на объекте гидромелиорации // Актуальные проблемы лесного комплекса: Материалы конф. Брянск: БГИТУ, 2021. Вып. 60. С. 57–60.

Pakhuchij V.V., Pakhuchaya L.M. A Multifactorial Model for Changes in the Radial Growth of Siberian Cedar at a Hydromelioration Site. *Current Issues of the Forestry Complex*: Proceedings of the Conference. Bryansk, Bryansk State Technological University of Engineering, 2021, iss. 60, pp. 57–60. (In Russ.).

17. Сабо Е.Д. Издалека видно яснее (о востребованности гидролесомелиорации в различные периоды развития) // Гидротехнические мелиорации земель лесного фонда: результаты и проблемы: материалы МНТС и науч. секции Россельхозакад. по гидролесомелиорации. С.-Петербург.: СПбГЛТА-СПбНИИЛХ, 2005. С. 140–146.

Sabo E.D. Clearer from Afar (on the Demand for Hydromelioration in Different Periods of Development). *Gigrotekhnicheskie melioratsii zemel' lesnogo fonda: rezul'taty i problemy*: Proceedings of the Scientific and Technical Council and the Scientific Section of the Russian Agricultural Academy on Forest Hydromelioration. St. Petersburg, St. Peters-

burg State Forestry Engineering Academy, St. Petersburg Forestry Research Institute, 2005, pp. 140–146. (In Russ.).

18. Савва Ю.В., Ваганов Е.А. Адаптация сосны обыкновенной к изменению климатических условий // Докл. АН. 2002. Т. 385, № 1. С. 135–138.

Savva Yu.V., Vaganov E.A. Adaptation of Scots Pine to Changing Climate Conditions. *Reports of the Academy of Sciences*, 2002, vol. 385, no. 1, pp. 135–138. (In Russ.).

19. Солнцев Р.В., Гулин А.Н. Реакция соснового древостоя и трансформация свойств лесоболотного торфа на экстенсивное осушение сфагнового болота в условиях Среднего Урала // Аграрн. вестн. Урала. 2010. № 1(67). С. 72–74.

Solntsev R.V., Gulin A.N. The Reaction of Pine Stands and the Transformation of the Properties of Bog Peat to Extensive Drainage of a Sphagnum Bog in the Middle Urals. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2010, no. 1(67), pp. 72–74. (In Russ.).

20. Схема гидролесомелиоративных мероприятий на землях гослесфонда Вычегодского, Лузского бассейнов и Верхней Печоры Коми АССР. Архангельск: Союзгипролесхоз, 1985. 270 с.

Scheme of Hydroforestry Measures on the State Forest Fund Lands of the Vychegda, Luza Basins and Upper Pechora of the Komi ASSR. Arkhangelsk, Soyuzgiproleskhoz Publ., 1985. 270 p. (In Russ.).

21. Тараканов А.М. Возрасты спелости и способы рубок осушаемых лесов // Лесн. хоз-во и комплексное природопользование: тр. СПбНИИЛХ. СПб, 2010. Вып. 2(22). С. 46–53.

Tarakanov A.M. Maturity Ages and Felling Methods for Drained Forests. *Forestry and Integrated Nature Management: Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute*, 2010, iss. 2(22), pp. 46–53. (In Russ.).

22. Третьяков С.В., Новоселов А.С., Попов О.С. Влияние гидротехнической мелиорации на формирование древесины *Pinus sylvestris* L. в Вологодской области // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2022. № 241. С. 99–119.

Tretyakov S.V., Novoselov A.S., Popov O.S. Influence of Hydrotechnical Melioration on the Formation of Wood *Pinus sylvestris* L. in the Vologda Region. *Izvestia Sankt-Petersburgskoj lesotekhniceskoi akademii*, 2022, no. 241, pp. 99–119. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.241.99-119>

23. Федотов И.В. Мониторинг состояния осушаемых лесов и ведение хозяйства в них на примере Архангельской области: автореф. дис. ... канд.с.-х. наук. Архангельск, 2017. 20 с.

Fedotov I.V. *Monitoring the Condition of Drained Forests and Forest Management in Them by the Example of the Arkhangelsk Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2017. 20 p. (In Russ.).

24. Феклистов П.А., Тюкавина О.Н. Особенности ассимиляционного аппарата, водного режима и роста деревьев сосны в осушенных сосняках. Архангельск: САФУ, 2014. 179 с.

Feklistov P.A., Tyukavina O.N. *Features of the Assimilation Apparatus, Water Regime and Growth of Pine Trees in Drained Pine Forests*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2014. 179 p. (In Russ.).

25. Чикалюк В.Ф., Кнize А.А. К вопросу о лесопользовании на осушенных площадях // Лесопользование и гидролесомелиорация: матер. Всерос. симп. Вологда: СевНИИЛХ, 2007. Ч. 1. С. 26–27.

Chikalyuk V.F., Knize A.A. On the Issue of Forest Management in Drained Areas. *Lesopol'zovanie i melioratsiya*: Proceedings of the All-Russian Symposium. Vologda, Northern Research Institute of Forestry, 2007, part 1, pp. 26–27. (In Russ.).

26. Юзепчук И.А. Осушение болот, покрытых сосной, в условиях Псковской области // Осушение и восстановление леса на заболоченных землях Северо-Запада. Ленинград: ЛенНИИЛХ, 1973. С. 29–38.

Yuzepchuk I.A. Drainage of Pine-Covered Swamps in the Pskov Region. *Osushenie i vosstanovlenie lesa na zabolochennykh zemlyakh Severo-Zapada*. Leningrad, Leningrad Forestry Research Institute, 1973, pp. 29–38. (In Russ.).

27. Dang Q.L., Lieffers V.J. Assessment of Patterns of Response of Tree Ring Growth of Black Spruce Following Peatland Drainage. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1989, vol. 19, no. 7, pp. 924–929. <https://doi.org/10.1139/x89-140>

28. Ferguson D.E., Carlson C.E. Height-Age Relationships for Regeneration-Size Trees in the Northern Rocky Mountains, USA. *Research Paper RMRS-RP-82WWW*. Colorado, Fort Collins, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2010. 19 p. <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-82>

29. *How to Determine Site Index in Silviculture: Participant's Workbook*. British Columbia, Ministry of Forests, Forest Practices Branch, 1999. 78 p. Available at: <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/forestry/silviculture/training-modules/sicourse.pdf> (accessed 13.02.25).

30. Hökkä H., Alenius V., Salminen H. Predicting the Need for Ditch Network Maintenance in Drained Peatland Sites in Finland. *Suo*, 2000, vol. 51, no. 1, pp. 1–10.

31. Indriksons A. Development of Dendrometrical Indices of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stand after the Forest Drainage. *2nd International Scientific Conference on Recent Advances in Information Technology, Tourism, Economics, Management and Agriculture – ITEMA 2018: Conference Proceedings*, 2018, pp. 1115–1122. <https://doi.org/10.31410/itema.2018.1115>

32. Joensuu S., Ahti E., Vuollekoski M. Discharge Water Quality from Old Ditch Networks in Finnish Peatland Forests. *Suo*, 2001, vol. 52, no. 1, pp. 1–15.

33. Joensuu S., Ahti E., Vuollekoski M. Long-Term Effects of Maintaining Ditch Networks on Runoff Water Quality. *Suo*, 2001, vol. 52, no. 1, pp. 17–28.

34. Krause C., Lemay A. Root Adaptations of Black Spruce Growing in Water-Saturated Soil. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 52, no. 5, pp. 653–661. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0310>

35. Maltamo M., Kinnunen H., Kangas A., Korhonen L. Predicting Stand Age in Managed Forests using National Forest Inventory Field Data and Airborne Laser Scanning. *Forest Ecosystems*, 2020, vol. 7, art. no. 44. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00254-z>

36. Pallardy S.G. *Physiology of Woody Plants*: Third Edition. Academic Press is an Imprint of Elsevier, 2008. 454 p.

37. Samariks V., Kēniņa L., Kitenberga M., Aun K., Varik M., Liepiņa A.A., Jansons A. The Effect of Drainage on Fine-Root Biomass, Production, and Turnover in Hemi-boreal Old-Growth Forests on Organic Soils. *Ecosphere*, 2024, vol. 15, iss. 4, art. no. e4849. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4849>

38. Sarkkola S., Hökkä H., Penttilä T. Natural Development of Stand Structure in Peatland Scots Pine Following Drainage: Results Based on Long-Term Monitoring of Permanent Sample Plots. *Silva Fennica*, 2004, vol. 38, iss. 4, pp. 405–412. <https://doi.org/10.14214/sf.408>

39. Socha J. Long-Term Effect of Wetland Drainage on the Productivity of Scots Pine Stands in Poland. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 274, pp. 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.032>

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 582.475:58.036.5:630*232.32

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-92-105

Морозоустойчивость контейнерных семян сосны обыкновенной в условиях высоких широт

Н.П. Чернобровкина[✉], д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: [K-6120-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

Е.В. Робонен, науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-1958-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

А.В. Егорова, канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [K-6095-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

К.Г. Нелаева, аспирант; ResearcherID: [GYJ-7223-2022](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

Е.А. Копосова, стажер-исследователь; ResearcherID: [ODM-1685-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1804-9042>

Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; chernobrovkina50@bk.ru[✉], er51@bk.ru, egorova.anast@mail.ru, nelaevakg@krc.karelia.ru, elena-kpv@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.10.24 / Одобрена после рецензирования 26.11.24 / Принята к печати 28.11.24

Аннотация. Совершенствуется технология производства посадочного материала с закрытой корневой системой основных лесообразующих пород с использованием многоротационного режима выращивания. В лесных питомниках подзоны среднетаежных лесов России с коротким вегетационным периодом затруднено внедрение такого режима из-за риска неподготовленности семян к пересадке на лесокультурную площадь, низкой стрессоустойчивости. По окончании вегетационного периода в ноябре 2023 г. проводили сравнительный анализ 1-летних контейнерных семян *Pinus sylvestris* L. при безротационном (0rot), а также 2-ротационном (2rot) режимах выращивания в условиях северных широт. Опытный вариант 1rotT отличался от 1rot (1-ротационный режим) использованием затеняющей сетки. У семян определяли морфометрические показатели, обеспеченность основными элементами минерального питания (N, P, K). Исследовали динамику индекса повреждения мембран клеток хвои низкими температурами в осенний период при переходе растения от вегетации к состоянию покоя. Морфометрические показатели у семян 2rot, за исключением диаметра стволика, были ниже, чем у семян других вариантов, и не соответствовали стандартным. Хвоя и стебли семян 2rot отличались от всех вариантов повышенными уровнями азота и калия, а также фосфора в стеблях по сравнению с вариантами 0rot и 1rotT. В отличие от других вариантов их хвоя имела ярко-зеленую окраску, у них не была сформирована верхушечная почка. Хвоя семян всех режимов выращивания в 1-й декаде сентября была устойчива к низким температурам лишь до –4 °С. Морозоустойчивость хвои семян повышалась и в 3-й декаде октября во всех вариантах, кроме 2rot, хвоя не повреждалась даже при –25 °С. Сеянцы 2rot отличались от других вариантов пониженной морозоустойчивостью хвои со 2-й декады сентября. Учитывая возможность заморозков в осенний период, существует риск повреждения семян 2rot.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, сеянцы, морфометрические показатели семян, химические показатели семян, морозоустойчивость, высокие широты

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-26-00192, <https://rscf.ru/project/23-26-00192/> и за счет финансирования по теме госзадания ИЛ КарНЦ РАН на научном оборудовании ЦКП ФИЦ КарНЦ РАН.

Для цитирования: Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Егорова А.В., Нелаева К.Г., Копосова Е.А. Морозоустойчивость контейнерных сеянцев сосны обыкновенной в условиях высоких широт // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 92–105.
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-92-105>

Original article

Frost Resistance of Containerized Scots Pine Seedlings in High Latitudes

Nadezhda P. Chernobrovkina[✉], Doctor of Biology, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

Elena V. Robonen, Research Scientist; ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0001-7926-8672),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

Anastasiya V. Egorova, Candidate of Agriculture, Junior Research Scientist;
ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

Karina G. Nelaeva, Postgraduate Student; ResearcherID: [GYJ-7223-2022](https://orcid.org/0000-0002-3283-4451),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

Elena A. Kuposova, Intern-Researcher; ResearcherID: [ODM-1685-2025](https://orcid.org/0009-0005-1804-9042),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1804-9042>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; chernobrovkina50@bk.ru[✉], er51@bk.ru, egorova.anast@mail.ru, nelaevakg@krc.karelia.ru, elena-kpv@yandex.ru

Received on October 18, 2024 / Approved after reviewing on November 26, 2024 / Accepted on November 28, 2024

Abstract. The technology for producing planting stock with a closed root system of the main forest-forming species using a multi-rotation cultivation mode is being improved. In forest nurseries of the middle taiga forest subzone of Russia with a short growing season, the introduction of such a regime is difficult due to the risk of seedlings being unprepared for transplantation to a planting area and low stress resistance. At the end of the growing season in November 2023, a comparative analysis of 1-year-old containerized seedlings of *Pinus sylvestris* L. was carried out under non-rotation (0rot) and 2-rotation (2rot) cultivation modes in northern latitudes. The experimental 1rotT variant has differed from the 1rot (1-rotation mode) by the use of a shade cloth. Morphometric parameters and the provision of basic mineral nutrients (N, P, and K) have been determined in seedlings. The dynamics of the index of damage to pine needle cell membranes by low temperatures in the autumn period during the transition of the plant from vegetation to dormancy has been studied. The morphometric parameters of the 2rot seedlings, with the exception of the stem diameter, have been lower than those of the seedlings of other variants and have not corresponded to the standard ones. The needles and stems of 2rot seedlings have differed from all variants in increased levels of nitrogen and potassium, as well as phosphorus in the stems compared to the 0rot and 1rotT variants. Unlike other variants, their needles have been bright green and they had not had an apical bud. The needles of seedlings of all cultivation modes in the 1st ten days of September have been resistant to low temperatures only down to -4°C . The frost resistance of seedling nee-



dles has increased and in the 3rd ten-day period of October in all variants except 2rot the needles have not been damaged even at -25°C . The 2rot seedlings have differed from other variants in their reduced frost resistance of needles from the 2nd ten-day period of September. Considering the possibility of frosts in the autumn period, there is a risk of damage to 2rot seedlings.

Keywords: *Pinus sylvestris*, seedlings, morphometric parameters of seedlings, chemical indicators of seedlings, frost resistance, high latitudes

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-26-00192, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/> and with funding under the state assignment for the Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences using the scientific equipment of the Collective Use Centre of the Federal Research Centre “Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences”.

For citation: Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Egorova A.V., Nelaeva K.G., Koposova E.A. Frost Resistance of Containerized Scots Pine Seedlings in High Latitudes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 92–105. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-92-105>

Введение

В производстве посадочного материала с закрытой корневой системой основных лесобразующих пород в тепличных комплексах используется 2-ротационный режим выращивания, который позволяет в 2 раза повысить выход посадочного материала за 1 сезон [1–4, 11]. В лесных питомниках зоны среднетаежных лесов России с коротким вегетационным периодом затруднено внедрение такого режима в связи с риском неподготовленности сеянцев 2-й ротации к стрессовым ситуациям осенне-зимне-весеннего периода при пересадке на лесокультурную площадь. Необходимо исследование стрессоустойчивости контейнерных сеянцев хвойных пород при 2-ротационном выращивании в условиях короткого вегетационного периода высоких широт.

Для оценки потенциала ростовой и адаптационной активностей сеянцев древесных растений используют морфометрические, химические и физиологические показатели [7, 11, 26, 29]. Для отдельных регионов РФ регламентированы минимальные высота сеянцев и диаметр у корневой шейки (приказ Мин-ва природ. ресурсов и экологии РФ от 29.12.2021). Для более полной оценки качества контейнерных сеянцев древесных растений широко используются интегральные критерии качества, включающие 2 и более морфометрических показателя [7]. Химические характеристики сеянцев указывают на обеспеченность их элементами минерального питания по валовому химическому составу хвои (листьев) [6].

Морозоустойчивость является значимым физиологическим критерием качества сеянцев хвойных пород, определения оптимальных сроков посадки на лесокультурную площадь [17, 23, 35, 40]. При оценке сохранности контейнерных сеянцев ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и сосны обыкновенной в морозильной камере при -4°C в течение зимнего периода и оценке их жизнеспособности после хранения проведено сравнение 2 методов исследования: измерения морозоустойчивости сеянцев и их массы [29]. Отмечаются преимущества учета морозоустойчивости для прогнозирования выживания и успешности роста сеянцев хвойных после длительного хранения при низких температурах и отсутствии освещения.

Формирование морозоустойчивости растений сопряжено со снижением и затем прекращением роста, образованием верхушечной почки, на которую влияет совокупность факторов окружающей среды – продолжительность светового периода, температура воздуха и почвы [20, 21, 24, 28]. Повреждение растений заморозками происходит в результате сложного взаимодействия, включающего минимальную температуру, количество циклов замораживания и оттаивания, их скорость [30]. Низкие температуры могут оказывать отрицательное действие как непосредственно на состояние клеточных мембран органов и тканей растения, так и косвенно путем влияния на их водный статус, становиться причиной фото-повреждений и фото-ингибирования. Для различных древесных пород и разного возраста морозоустойчивость неодинакова [15, 16, 33, 34], что обусловлено физиологическими механизмами, характерными для каждого вида и экотипа [27, 37, 39]. Восприимчивость растений к морозам различается в зависимости от климатических условий места происхождения [32].

Первичными участками повреждения низкими температурами являются клеточные мембраны, удерживающие электролиты внутри клеток (в большинстве – ионы металлов и внутриклеточные метаболиты), в результате клеточные мембраны теряют целостность, что позволяет электролитам просачиваться из клетки. Оценка повреждений клеток низкими температурами может быть произведена сравнением электропроводности водных экстрактов из тканей контрольного образца растения с водными экстрактами растений, которые подвергали температурным воздействиям различной интенсивности. Метод утечки электролитов является чувствительным, широко используется в мировой практике и имеет множество вариантов реализации при едином общем принципе. Метод применяли для диагностики приживаемости после пересадки сеянцев сосны алеппской (*Pinus halepensis* Mill.) [35]. Переход растений в состояние покоя сопровождается повышением морозоустойчивости, тогда как выход из него весной и начало активного роста влекут за собой ее снижение, поэтому ранние осенние и поздние весенние заморозки могут быть губительны для растений.

Цель работы – исследование формирования морозоустойчивости контейнерных сеянцев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. 2-ротационного выращивания в условиях высоких широт с использованием морфометрических, химических и физиологических показателей.

Объекты и методы исследования

Эксперимент по 2-ротационному режиму выращивания контейнерных сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях короткого вегетационного периода проводили в 2023 г. на территории Республики Карелии на базе тепличного комплекса «Вилга» (61°49' с. ш. 34°04' в. д.). При посеве использовали семена сосны обыкновенной 1-го класса качества (ГОСТ 14161–86), полученные в Медвежьегорском центральном лесничестве (62°90' с. ш. 34°45' в. д.).

Контрольный вариант (0rot) выращивали по стандартной агротехнике [8]. Опытные варианты: 1-ая ротация (1rot) и 2-я ротация (2rot) – отличались от контрольного сроками посева в закрытом грунте и перевода в открытый грунт (табл. 1). При выращивании сеянцев без ротаций (0rot) семена высевали 15 мая и выносили сеянцы на площадку закаливания 15 сентября. Посев семян 1rot и 2rot проводили соответственно 15 апреля и 25 июня 2023 г., вынос

на открытую площадку осуществляли соответственно 20 июня и 15 сентября. Опытный вариант 1rotT отличался от 1rot использованием на площадке закаливания затеняющей сетки (ООО «РассадаТара», Россия) на 55 дней – с 28 июня по 22 августа 2023 г. Сетка способствовала созданию условий, приближенных к условиям теплицы – повышению влажности воздуха и почвы, концентрации CO₂, снижению амплитуды перепада температур.

Таблица 1

Экспериментальная схема выращивания 1-летних контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* в 2023 г.
The experimental design for growing 1-year-old containerized *Pinus sylvestris* seedlings in 2023

Вариант	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Вегетацион- ный сезон	Продолжительность выращивания	
	закрытый грунт/открытый грунт, дни							дни	%
0rot	0/0	17/0	30/0	31/0	31/0	14/16	123/16	139	100
1rot	16/0	31/0	19/11	0/31	0/31	0/30	66/103	169	122
1rotT	16/0	31/0	19/11	0/31	0/31	0/30	66/103	169	122
2rot	0/0	0/0	6/0	31/0	31/0	14/16	82/16	98	71

Сеянцы сосны 0rot выращивали в течение 139 дней, из них 123 дня – в условиях теплицы. Сеянцы вариантов 1rot и 1rotT выращивали по одной схеме – 169 дней, из них 66 дней – в теплице. Период выращивания сеянцев 2rot составил 98 дней, в условиях теплицы – 82 дня. Для количественного сравнения режимов выращивания общую продолжительность выращивания сеянцев 0rot принимали за 100 % (сезон). Общую продолжительность выращивания за сезон в каждом варианте выражали как долю (%) от 0rot (от сезона). При 1rot и 2rot значения составили соответственно 122 и 71 %.

Морфометрические методы. В ноябре 2023 г. определяли морфометрические показатели сеянцев сосны вариантов: 1rot, 1rotT, 2rot, 0rot. В каждом варианте случайным образом отбирали по 30 сеянцев, промывали корневую систему. Измеряли длину надземной части от корневой шейки до основания терминальной почки (SH) и диаметр стволика у основания корневой шейки (RCD) (далее – стволика). Каждый сеянец разделяли на органы, устанавливали гравиметрическим методом сырую массу сеянца (TWM), надземной части (SWM), хвои (NWM), стволика (STWM), почек (BWM) и корней (RWM), определяли их влажность (%) и рассчитывали сухую массу (соответственно TDM, SDM, NDM, STDM, BDM и RDM).

Химические методы. В ноябре 2023 г. хвою сеянцев 4 вариантов эксперимента подвергали лиофильной сушке (лиофильная сушилка ЛС1000, Россия). Проводили анализ хвои на элементный состав в 3-кратной биологической повторности. Содержание общего азота определяли на CHNS-анализаторе (PerkinElmer’s 2400 Series II CHNS/O, США); фосфора – по цветной реакции с молибдатом аммония со спектрофотометрическим окончанием (Спектрофотометр СФ-2000, Россия), калия – атомно-эмиссионным методом (Shimadzu AA 7000, Япония).

Определение морозоустойчивости хвои контейнерных сеянцев сосны. В период завершения вегетационного сезона 2023 г. (сентябрь–октябрь) исследовали процесс формирования морозоустойчивости сеянцев. Уровень морозоустойчивости оценивали кондуктометрическим методом утечки электролитов через клеточные мембраны хвои после низкотемпературного воздействия. За-

меры проводили подекадно по всем вариантам эксперимента. В каждую дату испытывали воздействие нескольких температур. Их диапазоны составили от $-4 \dots -20$ °C в начале сентября до $-8 \dots -25$ °C в конце октября. Сдвиг используемых в эксперименте температур в сторону понижения от сентября к октябрю был обусловлен уменьшением температур, при которых происходил полный выход электролитов из клеток хвои.

Степень повреждения клеточных мембран в различных вариантах оценивали по «индексу повреждения» (It), рассчитываемому по формуле [22]:

$$It = 100 \times \left(\frac{ECf}{ECk} - \frac{ECc}{ECk} \right) / \left(1 - \frac{ECc}{ECk} \right),$$

где ECf – электропроводность опытных растворов после экстрагирования навески, $\text{мСм} \cdot \text{см}^{-1}$; ECc – электропроводность контрольных растворов после экстрагирования навески, $\text{мСм} \cdot \text{см}^{-1}$; ECk – электропроводность растворов после автоклавирования с последующим экстрагированием (общая электропроводность), $\text{мСм} \cdot \text{см}^{-1}$.

Математическую обработку данных проводили с использованием пакетов программ Microsoft Excel и Statistica. Результаты представлены в виде диаграмм, построенных по средним арифметическим значениям экспериментальных данных. Данные проанализированы с применением однофакторного дисперсионного анализа для выявления различий средних параметров режимов выращивания при 3–5 биологических повторностях. Тест Тьюки использовали при парных сравнениях (как апостериорный тест) режимов выращивания. Достоверность различий проверена на уровне значимости 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Морфометрические показатели сеянцев. Исследование контейнерных сеянцев сосны 4 вариантов эксперимента позволило выявить, что по морфометрическим показателям (SH, RSD, TDM, SDM, NDM, BDM, SQ) сеянцы вариантов эксперимента 0rot и 1rot были близки (табл. 2).

Таблица 2

**Морфометрические показатели контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* в 2023 г.
The morphometric parameters of containerized *Pinus sylvestris* seedlings in 2023**

Показатель	0rot	1rot	1rotT	2rot	F (p)
SH, см	16,9±0,2 a	17,9±0,4 a	21,7±0,2 c	7,3±0,1 b	177 (<0,05)
RCD, мм	3,0±0,4 ab	2,8±0,4 ab	4,2±0,3 b	2,0±0,2 c	71 (<0,05)
TDM, г	1,3±0,4 a	1,2±0,3 a	1,5±0,2 c	0,5±0,1 b	69 (<0,05)
SDM, г	0,8±0,2 a	0,9±0,2 a	1,1±0,2 c	0,3±0,1 b	70 (<0,05)
NDM, г	0,5±0,2 a	0,5±0,1 a	0,6±0,1 c	0,3±0,1 b	32 (<0,05)
SBDM, г	0,3±0,1 b	0,4±0,2 c	0,5±0,1 d	0,1±0,02 a	74 (<0,05)
RDM, г	0,5±0,1 c	0,3±0,1 a	0,4±0,1 a	0,2±0,04 b	57 (<0,05)
BDM, мг	1,2±0,5 a	1,1±0,4 a	1,2±0,4 a	0,3±0,1 b	35 (<0,05)
SQ	1,2±0,3 a	1,3±0,2 ab	1,3±0,2 b	0,7±0,1 c	63 (<0,05)
SRR	1,7±0,4 b	2,6±0,6 a	2,6±0,4 a	2,2±0,6 c	24 (<0,05)
DQI	0,2±0,1 b	0,1±0,04 a	0,2±0,03 ab	0,1±0,02 c	28 (<0,05)

Примечание: Разные буквы указывают на достоверную разницу между вариантами, оцененную с помощью теста Тьюки. Df = 119.

По высоте (17–22 см) и диаметру стволика (2,8–3,2 мм) экземпляры этих вариантов и варианта 1rotT значительно превосходили стандартные сеянцы (соответственно на 8 см и 2 мм). Повышенные биометрические показатели (SH, RSD, TDM, SDM, NDM, SBDM) отмечены для сеянцев варианта 1rotT. Все морфометрические показатели у сеянцев 2rot были достоверно ниже, чем в контроле и в вариантах 1rot и 1rotT. Высота сеянцев 2rot не достигала стандартных размеров (6 см), в отличие от диаметра стволика (2 мм). По интегральным коэффициентам качества (SQ, DQI) сеянцы 2rot также характеризовались пониженным уровнем, за исключением показателя SRR, выражающего отношение масс надземной части к подземной, который у сеянцев 2rot был достоверно выше варианта 0rot, но ниже, чем у сеянцев 1rot и 1rotT.

Элементный состав сеянцев. В хвое сеянцев всех вариантов эксперимента уровни азота были ниже рекомендуемых значений для закрытого грунта [6] (табл. 3). Обеспеченность фосфором и калием сеянцев всех вариантов, по данным исследования содержания элементов в хвое, превосходила средний и высокий уровни рекомендуемых значений [6]. Сопоставление элементного состава сеянцев по органам показало, что хвоя сеянцев 2rot достоверно отличалась от других вариантов повышенным уровнем азота и калия, стебли сеянцев 2rot превосходили другие варианты по содержанию азота, фосфора (кроме варианта 1rot) и калия. Корни сеянцев 2rot не выделялись среди других вариантов по количеству исследуемых элементов, за исключением увеличенного уровня азота по сравнению с вариантом 1rot.

Таблица 3

Элементный состав органов контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris*
(% от сухой массы)

The elemental composition of the organs of containerized *Pinus sylvestris* seedlings
(% of dry weight)

Орган	Вариант	N	P	K
Хвоя	0rot	0,9±0,1 a	0,3±0,2 a	0,9±0,1 a
	1rot	0,7±0,02 a	0,2±0,1 a	0,9±0,04 a
	1rotT	0,9±0,2 a	0,3±0,1 a	0,9±0,2 a
	2rot	1,4±0,3 b	0,3±0,1 a	1,3±0,1 b
	F (p)	10 (<0,05)	1 (0,64)	10 (<0,05)
Стебли	0rot	0,4±0,1 a	0,2±0,1 a	0,9±0,1 a
	1rot	0,6±0,2 a	0,3±0,1 ab	0,9±0,04 a
	1rotT	0,6±0,2 a	0,2±0,1 a	0,8±0,1 a
	2rot	1,3±0,3 b	0,5±0,1 b	1,5±0,2 b
	F (p)	11 (<0,05)	8 (<0,05)	16 (<0,05)
Корни	0rot	0,9±0,2 ab	0,3±0,2 a	1±0,1 a
	1rot	0,6±0,1 a	0,3±0,2 a	0,7±0,1 a
	1rotT	0,9±0,3 ab	0,4±0,1 a	0,9±0,2 a
	2rot	1,2±0,3 b	0,2±0,1 a	0,9±0,1 a
	F (p)	4 (<0,05)	2 (0,2)	2 (0,2)

Примечание: Df = 11. Отбор сеянцев проводили 08.11.2023.

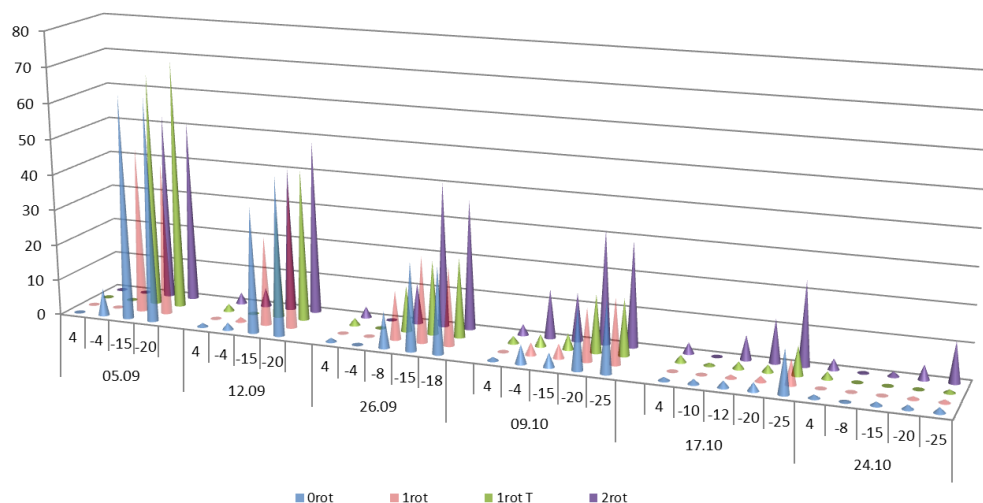
Формирование морозоустойчивости сеянцев. Исследование динамики индекса повреждения мембран клеток хвои низкими температурами в осенний период показало, что сеянцы всех режимов выращивания в 1-й декаде сентября были устойчивы к температурам до -4°C , при понижении температуры до -15°C у растений всех вариантов отмечался высокий индекс повреждения – до 70 % (табл. 4). В течение сентября и октября морозоустойчивость сеянцев всех вариантов увеличивалась, достигая максимума в 3-й декаде октября, когда хвоя сеянцев всех вариантов, кроме 2rot, не повреждалась даже при -25°C . Сеянцы 2rot по сравнению с другими вариантами эксперимента отличались пониженной морозоустойчивостью хвои со 2-й декады сентября (см. рисунок).

Таблица 4

Индексы повреждения клеточных мембран хвои контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* при воздействии низких температур в период формирования морозоустойчивости в сентябре–октябре 2023 г.
The damage indices of cellular membranes of needles of containerized *Pinus sylvestris* seedlings when exposed to low temperatures during the period of frost resistance development in September–October 2023

Дата	Температура, $^{\circ}\text{C}$	0rot	1rot	1rotT	2rot	F (p)
05.09	-4	$7,7\pm0,4$ b	0	0	0	111 ($<0,05$)
	-15	$63,3\pm4,2$ fgh	$47,6\pm5,1$ cde	$65,8\pm6,2$ cde	$53,4\pm2,2$ cdefg	
	-20	$63,1\pm4,9$ fgh	$43,8\pm4,7$ cd	$70,1\pm3,4$ h	$51,9\pm2,0$ cdef	
12.09	-4	$2,0\pm0,2$ b	$1,2\pm0,0$ b	0	$5,2\pm1,2$ b	79 ($<0,05$)
	-15	$35,2\pm6,1$ cde	$25,1\pm1,6$ c	0	$40,2\pm3,2$ def	
	-20	$44,0\pm5,0$ ef	$40,5\pm3,0$ def	$42,6\pm6,5$ def	$49,0\pm2,8$ f	
26.09	-8	$7,6\pm1,5$ b	$12,6\pm2,0$ b	$13,1\pm1,6$ b	$11,4\pm4,0$ b	90 ($<0,05$)
	-15	$24,6\pm0,8$ c	$23,0\pm1,0$ c	$20,7\pm4,3$ c	$40,7\pm3,0$ d	
	-18	$24,1\pm1,9$ c	$20,8\pm0,8$ c	$22,3\pm3,4$ c	$36,3\pm1,5$ d	
09.10	-4	$5,3\pm0,7$ a	$3,4\pm0,2$ a	$3,4\pm0,6$ a	$13,6\pm3,4$ b	94 (0,19)
	-15	$3,9\pm0,4$ a	$4,0\pm0,9$ a	$4,4\pm0,1$ a	$13,4\pm2,0$ b	
	-20	$17,4\pm2,1$ bcd	$14,7\pm2,5$ bc	$16,1\pm2,6$ bcd	$31,6\pm2,6$ e	
	-25	$20,0\pm2,1$ d	$18,3\pm1,9$ cd	$15,8\pm2,3$ bcd	$29,4\pm2,2$ e	
17.10	-10	$1,5\pm0,5$ ab	$0,2\pm0,1$ ab	$0,7\pm0,0$ ab	0	119 ($<0,05$)
	-12	$1,9\pm0,8$ b	$0,9\pm0,1$ ab	$2,0\pm1,0$ b	$6,8\pm1,8$ c	
	-20	$2,4\pm0,9$ b	$1,5\pm0,2$ ab	$2,1\pm1,0$ b	$12,1\pm1,6$ d	
	-25	$12,3\pm1,8$ d	$7,0\pm0,9$ c	$8,1\pm0,6$ c	$23,2\pm2,1$ e	
24.10	-8	$0,4\pm0,1$	0	0	$3,3\pm0,3$	42 ($<0,05$)
	-15	$1,1\pm0,5$	$0,7\pm0,1$	0	$5,0\pm1,0$	
	-20	$1,2\pm0,4$	$0,6\pm0,3$	0	$4,1\pm0,6$	
	-25	$2,9\pm0,8$	0	$0,4\pm0,4$	$11,3\pm2,1$	

Примечание: Df = 79.



Индексы повреждения клеточных мембран хвои контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* при воздействии низких температур ($-4\dots-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) в период формирования морозоустойчивости (сентябрь–октябрь 2023) в зависимости от вариантов режима выращивания

The damage indices of cellular membranes of needles of containerized *Pinus sylvestris* seedlings when exposed to low temperatures ($-4\dots-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) during the period of frost resistance development (September–October 2023) depending on the cultivation mode variant

Количественные показатели биомассы сеянца и его органов в конце вегетационного периода характеризуют ростовую активность растения в течение вегетационного периода. Условия и продолжительность выращивания сеянцев вариантов эксперимента 0rot, 1rot, 1rotT способствовали тому, что по высоте и диаметру стволика они значительно превосходили установленные по региону размеры стандартных сеянцев. Повышенный по сравнению с другими вариантами уровень морфометрических показателей (SH, RSD, TDM, SDM, NDM, SBDM) у сеянцев варианта 1rotT обусловлен более длительным периодом выращивания и условиями, приближенными к условиям теплицы, которые способствовали ускоренному росту надземных органов сеянцев. Повышенный SRR у всех экспериментальных сеянцев по сравнению с вариантом 0rot позволяет прогнозировать их менее успешное выживание при высадке на лесокультурную площадь.

Достоверно низкие по сравнению с другими вариантами морфометрические показатели у сеянцев 2rot обусловлены менее длительным выращиванием на протяжении сезона. Высота сеянцев варианта 2rot не достигала стандартных размеров. Исследования, проведенные в Ленинградской области, также позволили выявить, что для получения стандартных сеянцев сосны и ели 2rot (посев 24 июня) необходимо их доращивание во 2-м вегетационном сезоне [10].

Химический состав хвои является чувствительным индикатором обеспеченности древесных растений элементами минерального питания [12]. На разных этапах развития сеянцы испытывают потребность преимущественно в определенном элементе питания. Так, в фазу начального роста им необходимо больше фосфора, в период усиленного роста – азота, тогда как после окончания роста надземной части – калия [5]. По результатам данного эксперимента хвоя сеянцев всех вариантов характеризовалась низким уровнем азота по сравнению с реко-

мендуемыми значениями для данного региона, что можно объяснить «эффектом разбавления» у сеянцев вариантов 0rot, 1rot и 1rotT с большой биомассой, превышающей рекомендуемую. Несмотря на большую биомассу сеянцев этих вариантов, уровни фосфора и калия в хвое оказались выше рекомендуемых. Показано, что сеянцы ели ситхинской (*Picea sitchensis*) с увеличенным содержанием фосфора были менее устойчивы к ранним осенним заморозкам по сравнению с сеянцами с более низким содержанием элемента [31]. А осенние подкормки азотом сеянцев сосны смолистой (*Pinus resinosa* Ait.) способствовали росту стволика и усилению морозоустойчивости после 1-го вегетационного периода [25].

Хвоя и стебли сеянцев 2rot отличались от всех вариантов повышенным уровнем азота и калия, а также фосфора в стеблях по сравнению с вариантами 0rot и 1rotT. В отличие от других вариантов их хвоя имела ярко-зеленую окраску, без характерного для осеннего периода пурпурного оттенка, у них не была сформирована верхушечная почка. Данные указывают на то, что сеянцы 2rot в отличие от других вариантов не закончили развитие с завершением вегетационного периода. Показано, что чем дальше сдвигаются сроки посева, тем больше требуется времени, чтобы после наступления критической длины дня, при которой начинается фото-ингибирование роста эпикотили, запустились процессы формирования почки [10]. Отсутствие сформированной почки у сеянцев не является фатальным для возобновления роста в весенний период. Разработана технология круглогодичного выращивания сеянцев древесных пород, в т. ч. хвойных, при которой сеянцы выращиваются в течение 2–5 недель в малообъемных кассетах в условиях светоустановки, далее хранятся в морозильной камере при температуре от –2 до –4 °C в течение 2–6 месяцев [36]. По мере производственной необходимости сеянцы помещают в оптимальные условия, и они возобновляют свой рост.

Значимым показателем качества сеянцев является морозоустойчивость, определяющая выживание растений при понижении температур. Ответную реакцию растения на пониженные температуры изучают по различным физиолого-биохимическим характеристикам: интенсивность роста, уровень хлорофилла, скорость фотосинтеза и транспирации, относительное содержание воды в тканях, относительный выход электролитов, интенсивность перекисного окисления липидов [13]. Метод утечки электролитов является чувствительным, успешно применяется в лесоводстве для оценки морозоустойчивости различных видов и генотипов древесных растений и имеет множество вариантов реализации при едином общем принципе [14, 18, 33, 35, 38]. Мониторинг индекса повреждения мембран клеток хвои низкими температурами в сентябре–октябре позволил выявить динамику формирования морозоустойчивости у контейнерных сеянцев сосны 4 вариантов эксперимента в осенний период, в фазу закаливания, когда осуществляется переход растения от вегетации к состоянию покоя. Низкие температуры вызывают множество физиологических реакций у растений, которые способствуют формированию адаптационных механизмов, обеспечивающих их холодо- и морозоустойчивость [9, 38].

Сеянцы 2rot по сравнению с другими вариантами эксперимента отличались пониженной морозоустойчивостью хвои в период исследования со 2-й декады сентября, что обусловлено непродолжительным периодом их выращивания. В хвое сеянцев варианта 2rot в конце октября индекс повреждения (при –25 °C) составлял 11,2 %, это может указывать на недостаточную подготовленность сеянцев к зиме. Существует риск их повреждения в октябре, учитывая

возможность заморозков в условиях северных широт в данный период. Успешность сохранения посадочного материала в зимнее время существенно зависит от погодных условий и наличия снежного покрова. Во избежание рисков повреждения семян в зимний период в практике питомнических хозяйств используется хранение семян в морозильных камерах с поддержанием температуры от -3 до -5 °C [19]. Низкая морозоустойчивость у контейнерных семян сосны обыкновенной и ели европейской, выявленная при закладке на хранение в морозильные камеры, коррелировала с большой гибелью растений в тесте на выращивание после хранения [29]. По наблюдениям авторов семена сосны и ели можно считать подготовленными к зимнему хранению в морозильных камерах ($-3...-5$ °C), если у верхушечной части побега индекс повреждения при температуре -25 °C не превышает 4 %.

Заключение

Показано формирование морозоустойчивости хвои контейнерных семян сосны обыкновенной в осенний период при безротационном (0rot), а также при внедряемом в условиях высоких широт 2-ротационном (2rot) режимах выращивания. Результаты исследования роста, элементного состава и устойчивости к низким температурам контейнерных семян выявили проблему, которая связана с преимущественно низкими морфометрическими показателями семян 2rot, не соответствующими стандарту и с пониженной морозоустойчивостью. Непродолжительный период выращивания отразился и на химическом составе органов – хвоя и стебли семян 2rot отличались от остальных вариантов повышенными уровнями азота и калия, а также фосфора в стеблях по сравнению с вариантами 0rot и 1rotT (1-ротационный режим с затеняющей сеткой). Хвоя семян 2rot имела ярко-зеленую окраску без характерного для морозоустойчивых семян пурпурного оттенка, у них не была сформирована верхушечная почка. Данные указывают на то, что семена 2rot в отличие от других вариантов не остановились в развитии с окончанием вегетационного периода. С целью повышения качества семян 2rot целесообразно испытание при их выращивании регуляторов роста, стимулирующих развитие в высоту и увеличение устойчивости к низким температурам. Устранение проблемы при выращивании семян 2rot возможно подбором оптимальных сроков посева семян, удлинением периода вегетации и урегулированием обеспечения элементами питания. Предлагается также проверить морозоустойчивость семян 2rot не только по индексу повреждения мембран клеток хвои, но и испытав интактное растение в условиях климатокamеры. Исследования в этом направлении необходимы для успешного лесовосстановления, а также для прогнозирования выживания хвойных растений на ювенильной стадии развития в условиях меняющегося климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бобушкина С.В. Приемы повышения эффективности производства посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой в Архангельской области // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 6. С. 45–54.
Bobushkina S.V. Efficiency Production Methods of Conifers Ball-Rooted Planting Stock in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-45-54>

2. Гаврилова О.И., Дмитриева М.И., Нелаева К.Г. Перспективы применения двухротационного выращивания сеянцев в питомниках Карелии // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 64. С. 185–188.

Gavrilova O.I., Dmitrieva M.I., Nelaeva K.G. Prospects for the Application of Dual-Rotation Seedling Cultivation in Nurseries in Karelia. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2023, no. 64, pp. 185–188. (In Russ.).

3. Жигунов А.В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. СПб.: СПб НИИЛХ, 2000. 293 с.

Zhigunov A.V. *Theory and Practice of Growing Planting Material with a Closed Root System*. St. Petersburg, Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2000. 293 p. (In Russ.).

4. Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. Выращивание посадочного материала закрытой корневой системой в Архангельской области // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 1. С. 79–83.

Mochalov B.A., Bobushkina S.V. The Growing of Containerized Seedlings in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2012, no. 1, pp. 79–83. (In Russ.).

5. Наквасина Е.Н. Ритмика роста сеянцев сосны и ели. Биоэкологическое обоснование агротехники выращивания. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2016. 158 с.

Nakvasina E.N. *Rhythmic Growth of Pine and Spruce Seedlings. Bioecological Justification of Cultivation Techniques*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2016. 158 p. (In Russ.).

6. Наставления по системам применения удобрений в лесном хозяйстве на европейской территории СССР. 25 сентября 1991 года.

Guidelines for Fertilizer Application Systems in Forestry in the European Territory of the USSR. September 25, 1991. (In Russ.).

7. Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Зайцева М.И., Нелаева К.Г. Морфометрические критерии оценки качества контейнерных сеянцев хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 42–57.

Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Egorova A.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Morphometric Criteria for Assessing the Containerized Conifers Seedlings Quality. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 42–57. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-42-57>

8. Степанов С.А., Зайцева М.И. Выращивание и использование посадочного материала с закрытой корневой системой. Петрозаводск, 2015. 27 с.

Stepanov S.A., Zaitseva M.I. *Cultivation and Use of Planting Stock with a Closed Root System*. Petrozavodsk, 2015. 27 p. (In Russ.).

9. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Изменчивость биохимических признаков *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при адаптации форм в условиях избыточного увлажнения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 58–75.

Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Y.E., Pakhov A.S. Variability of Biochemical Properties During Adaptation of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Forms to Excessive Moisture Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 58–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-58-75>

10. Федотов А.Н., Жигунов А.В. Влияние длины дня на формирование верхушечных почек у однолетних контейнеризированных сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. Вып. 215. С. 80–91.

Fedotov A.N., Zhigunov A.V. The Effect of the Day Length on the Formation of Apical Buds in One-Year-Old Containerized Seedlings of Scots Pine and Norway Spruce. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2016, iss. 215, pp. 80–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.80-91>

11. Чернобровкина Н.П. Экофизиологическая характеристика использования азота сосной обыкновенной. СПб.: Наука, 2001. 175 с.

Chernobrovkina N.P. *Ecophysiological Characteristics of Nitrogen Use by Scots Pine*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2001. 175 p. (In Russ.).

12. Чурагулова З.С. Почвы лесных питомников Южного Урала и оптимизация их лесорастительных свойств: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2004. 25 с.

Churagulova Z.S. *Soils of Forest Nurseries in the Southern Urals and Optimization of Their Forest-Vegetation Properties*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Tomsk, 2004. 25 p. (In Russ.).

13. Шибаева Т.Г., Икконен Е.Н., Шерудило Е.Г., Титов А.Ф. Влияние ежесуточных кратковременных понижений температуры на теплолюбивые и холодостойкие растения // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 4. С. 266–276.

Shibaeva T.G., Ikkonen E.N., Sherudilo E.G., Titov A.F. Effects of a Daily Short-Term Temperature Drop on Chilling-Sensitive and Cold-Resistant Plants. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2019, vol. 66, no. 4, pp. 266–276. (In Russ.).

<https://doi.org/10.1134/S0015330319040122>

14. Aronsson A., Eliasson L. Frost Hardiness in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). I. Conditions for Test on Hardy Plant Tissues and for Evaluation of Injuries by Conductivity Measurements. *Studia Forestalia Suecica*, 1970, no. 77, pp. 1–30.

15. Bannister P., Colhoun C.M., Jameson P.E. The Winter Hardening and Foliar Frost Resistance of Some New Zealand Species of *Pittosporum*. *New Zealand Journal of Botany*, 1995, vol. 33, pp. 409–414. <https://doi.org/10.1080/0028825X.1995.10412967>

16. Boorse G.C., Ewers F.W., Davis S.D. Response of Chaparral Shrubs to Below-Freezing Temperatures: Acclimation, Ecotypes, Seedlings vs. Adults. *American Journal of Botany*, 1998, vol. 85, iss. 9, pp. 1224–1230. <https://doi.org/10.2307/2446631>

17. Burr K.E., Tinus R.W., Wallner S.J., King R.M. Relationships among Cold Hardiness, Root Growth Potential and Bud Dormancy in Three Conifers. *Tree Physiology*, 1989, vol. 5, iss. 3, pp. 291–306. <https://doi.org/10.1093/treephys/5.3.291>

18. Climent J., Costa e Silva F., Chambel M.R., Pardos M., Almeida M.H. Freezing Injury in Primary and Secondary Needles of Mediterranean Pine Species of Contrasting Ecological Niches. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, art. no. 407.

<https://doi.org/10.1051/forest/2009016>

19. Colombo S.J. Second-Year Shoot Development in Black Spruce *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, vol. 16, no. 1, pp. 68–73. <https://doi.org/10.1139/x86-011>

20. Dormling I. Bud Dormancy, Frost Hardiness, and Frost Drought in Seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Advances in Plant Cold Hardiness*. Boca Raton, CRC Press, 1993, pp. 285–298. <https://doi.org/10.1201/9781351069526-20>

21. Ekberg I., Eriksson G., Dormling I. Photoperiodic Reactions in Conifer Species. *Ecography: A Journal of Space and Time in Ecology*, 1979, vol. 2, iss. 4, pp. 255–263. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1979.tb01297.x>

22. Flint H.L., Boyce B.R., Beattie D.J. Index of Injury – A Useful Expression of Freezing Injury to Plant Tissues as Determined by the Electrolytic Method. *Canadian Journal of Plant Science*, 1967, vol. 47, no. 2, pp. 229–230. <https://doi.org/10.4141/cjps67-043>

23. Folk R.S., Grossnickle S.C., Axelrood P., Trotter D. Seed Lot, Nursery, and Bud Dormancy Effects on Root Electrolyte Leakage of Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii*) Seedlings. *Canadian Journal of Plant Science*, 1999, vol. 79, no. 8, pp. 1269–1281. <https://doi.org/10.1139/x99-084>

24. Hannerz M., Westin J. Growth Cessation and Autumn-Frost Hardiness in One-Year-Old *Picea abies* Progenies from Seed Orchards and Natural Stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 15, iss. 3, pp. 309–317. <https://doi.org/10.1080/028275800447931>

25. Islam M.A., Apostol K.G., Jacobs D.F., Dumroese R.K. Fall Fertilization of *Pinus resinosa* Seedlings: Nutrient Uptake, Cold Hardiness, and Morphological Development. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, art. no. 704. <https://doi.org/10.1051/forest/2009061>

26. Krasowski M.J., Simpson D.G. Frost-Related Problems in the Establishment of Coniferous Forests. *Conifer Cold Hardiness*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 253–285. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_10

27. Larcher W. Climatic Constraints Drive the Evolution of Low Temperature Resistance in Woody Plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2005, vol. 61, iss. 4, pp. 189–202. <https://doi.org/10.2480/agrmet.61.189>
28. Lavender D.P. *Environment and Shoot Growth of Woody Plants*. Corvallis, Oregon State University, Forest Research Lab, 1981. 47 p.
29. Lindström A., Stattin E., Gräns D., Wallin E. Storability Measures of Norway Spruce and Scots Pine Seedlings and Assessment of Post-Storage Vitality by Measuring Shoot Electrolyte Leakage. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 8, pp. 717–724. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.977340>
30. Livingston W.H. Taking Advantage of Mother Nature to Overwinter Woody Plants. *L'Hivernage des Plantes Ligneuses et des Vivaces Ornementales. Proceedings of the Institut Québécois du Développement de L'Horticulture Ornementales (IQDHO)*. Trois Rivières Que, 1995, pp. 269–278.
31. Malcolm D.C., Freezaillah B.C.Y. Early Frost Damage on Sitka Spruce Seedlings and the Influence of Phosphorus Nutrition. *Forestry*, 1975, vol. 48, iss. 2, pp. 139–145. <https://doi.org/10.1093/forestry/48.2.139>
32. Malmqvist C., Wallertz K., Johansson U. Survival, Early Growth and Impact of Damage by Late-Spring Frost and Winter Desiccation on Douglas-Fir Seedlings in Southern Sweden. *New Forests*, 2018, vol. 49, pp. 723–736. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9635-7>
33. Malmqvist C., Wallertz K., Lindström A. Storability and Freezing Tolerance of Douglas-Fir and Norway Spruce Seedlings Grown in Mid-Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32, pp. 30–38. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1183704>
34. Meza-Basso L., Guarda P., Rios D., Alberdi M. Changes in Free Amino Acid Content and Frost Resistance in *Nothofagus dombeyi* Leaves. *Phytochemistry*, 1986, vol. 25, iss. 8, pp. 1843–1846. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)81159-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)81159-0)
35. Pardos M., Royo A., Gil L., Pardos J.A. Effect of Nursery Location and Outplanting Date on Field Performance of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* Seedlings. *Forestry*, 2003, vol. 76, iss. 1, pp. 67–81. <https://doi.org/10.1093/forestry/76.1.67>
36. Radoglou K., Dini-Papanastasi O., Kostopoulou P., Spyroglou G. Forest Regeneration Material: State of the Art and a New European Approach for Pre-Cultivated Planting Stock Production. *Forestry in Achieving Millennium Goals*. Serbia, Novi Sad, 2008, vol. 1, pp. 23–29.
37. Repo T., Zhang G., Ryyppö A., Rikala R., Vuorinen M. The Relation between Growth Cessation and Frost Hardening in Scots Pines of Different Origins. *Trees*, 2000, vol. 14, pp. 456–464. <https://doi.org/10.1007/s004680000059>
38. Ryyppö A., Repo T., Vapaavuori E. Development of Freezing Tolerance in Roots and Shoots of Scots Pine Seedlings -at Nonfreezing Temperatures. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, vol. 28, no. 4, pp. 557–565. <https://doi.org/10.1139/x98-022>
39. Savolainen O., Bokma F., García-Gil R., Komulainen P., Repo T. Genetic Variation in Cessation of Growth and Frost Hardiness and Consequences for Adaptation of *Pinus sylvestris* to Climatic Changes. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 197, iss. 1–3, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.006>
40. Simpson D.G. Frost Hardiness, Root Growth Capacity and Field Performance Relationships in Interior Spruce, Lodgepole Pine, Douglas-Fir, and Western Hemlock Seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, vol. 20, no. 5, pp. 566–572. <https://doi.org/10.1139/x90-073>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*8

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-106-118

Сокопродуктивность высокогорных кленовников Северного Кавказа

*Х.М. Хетагуров¹, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [AAI-6375-2021](https://orcid.org/0000-0002-2684-897X),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2684-897X>**И.А. Николаев¹, канд. биол. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2379-7601>**А.В. Грязькин², д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [C-6699-2018](https://orcid.org/0000-0002-7901-2180),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>**И.К. Сатцаева¹, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5749-6735>**Чан Чунг Тхань³, канд. с.-х. наук, исследователь; ResearcherID: [ABB-4415-2021](https://orcid.org/0000-0002-0728-3547),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0728-3547>*

¹Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, ул. Батутина, д. 44–46, г. Владикавказ, Россия, 362025; zaz81@inbox.ru, bootany@yandex.ru, catcaeva@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; lesovod@bk.ru

³Институт исследований экологии и лесной среды – Вьетнамская академия лесных наук, ул. Дык Тханг, д. 46, р-н Бак Ту Лиём, Ханой, Вьетнам; thanh.tt@rcfee.org.vn

Поступила в редакцию 18.09.24 / Одобрена после рецензирования 16.12.24 / Принята к печати 17.12.24

Аннотация. Представлены характеристики кленового сиропа *Acer Trautvetteri* Medw., произрастающего на северных макросклонах Кавказа. Объект исследования – высокогорные кленовики на нижней границе вертикального пояса их распространения. Географические координаты объекта: 42°56,352 с. ш., 44°29,677 в. д. Высота над уровнем моря 1374–1398 м. Крутизна склона – 30–35°, экспозиция склона – северная. Начало соковыделения – 3-я декада апреля, продолжительность процесса – 12–17 сут. Подсочка проводилась закрытым способом. Показано, что сокопродуктивность кленовика составляет в среднем около 4 т/га за сезон. Основные характеристики кленового сока и сиропа определены методом жидкостной хроматографии в изократическом и градиентном режимах. Химический состав сиропа, содержание органических и неорганических компонентов определяли с использованием жидкостного хроматографа «Мазетро» со спектрофотометрическим и рефрактометрическим детекторами. Количественный анализ элементного состава по атомным спектрам поглощения осуществлялся спектрометром Contra AA 800 с пламенным и электротермическим атомизаторами. Сахаристость сока – 0,9–1,3 %. Сироп из кленового сока получен методом выпаривания. Содержание сахаров в сиропе из сока клена Траутветтера – 41 %, что на 12 % меньше, чем в сиропе, произведенном в Канаде. Доля глюкозы в сиропе – 1,7 %, сахарозы – 39,2 %. Количество Са – 1286 мг/кг, К – 9063 мг/кг. Такие элементы, как Fe, Mn, Cu и Na в составе сиропа представлены в небольшом объеме – от 1 до 144 мг/кг. По содержанию выявленных химических элементов и органолептическим характеристикам сироп из сока клена Траутветтера отличается от сиропа из канадского клена сахарного. Полученные данные – вклад в решение задач по оценке запасов потенциальных пищевых ресурсов горных лесов России. Результаты исследования могут быть использованы при обновлении нор-

мативных документов в лесохозяйственной области, внедрены в учебные программы по подготовке специалистов лесного профиля.

Ключевые слова: горные леса, клен Траутветтера, сокопродуктивность, кленовый сироп

Благодарности: Все анализы проведены в ФГУ «Северо-Осетинский центр стандартизации, метрологии и сертификации».

Для цитирования: Хетагуров Х.М., Николаев И.А., Грязькин А.В., Сатцаева И.К., Чан Чунг Тхань. Сокопродуктивность высокогорных кленовников Северного Кавказа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 106–118. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-106-118>

Original article

Sap Productivity of the High-Mountain Maple Stands in the North Caucasus

Khetag M. Khetagurov¹, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [AAI-6375-2021](https://orcid.org/0000-0002-2684-897X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2684-897X>

Igor A. Nikolaev¹, Candidate of Biology, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2379-7601>

Anatoly V. Gryazkin²✉, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [C-6699-2018](https://orcid.org/0000-0002-7901-2180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

Inna K. Sattsaeva¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5749-6735>

Chan Chung Thanh³, Candidate of Agriculture, Researcher; ResearcherID: [ABB-4415-2021](https://orcid.org/0000-0002-0728-3547),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0728-3547>

¹North Ossetian State University named after Kosta Levanovich Khetagurov, ul. Vatutina, 44–46, Vladikavkaz, 362025, Russian Federation; zaz81@inbox.ru, bootany@yandex.ru, catcaeva@mail.ru

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

³Research Institute for Forest Ecology and Environment, Vietnamese Academy of Forest Sciences, Duc Thang Str., 46, Bac Tu Liem District, Hanoi, Vietnam; thanh.tt@rcfee.org.vn

Received on September 18, 2024 / Approved after reviewing on December 16, 2024 / Accepted on December 17, 2024

Abstract. The characteristics of maple syrup produced from *Acer Trautvetteri* Medw., growing on the northern macroslopes of the Caucasus, are presented in the article. The object of the study has been high-mountain maple stands at the lower limit of the vertical belt of their distribution. The geographical coordinates of the object are 42°56.352 N, 44°29.677 E. The altitude above sea level is 1374–1398 m. The slope steepness is 30–35°, the slope is exposed to the north. The beginning of sap secretion is the 3rd ten-day period of April, the duration of sap production is 12–17 days. The tapping has been carried out using a closed method. It has been shown that maple stand sap productivity averages about 4 t/ha per season. The main characteristics of maple sap and syrup have been determined by liquid chromatography in isocratic and gradient modes. The chemical composition of the syrup and the content of organic and inorganic components have been determined using a Maestro liquid chromatograph with spectrophotometric and refractometric detectors. The quantitative analysis of the elemental composition based on atomic absorption spectra has been carried out using a Contra AA 800



spectrometer with a flame and electrothermal atomizers. The sugar content in the sap has equaled 0.9–1.3 %. Maple sap syrup has been obtained by evaporation. The sugar content in the Trautvetter maple syrup has equaled 41 %, which is 12 % less than in the syrup produced in Canada. The proportion of glucose in the syrup is 1.7 %, the proportion of sucrose – 39.2 %. The content of Ca is 1286 mg/kg, the content of K – 9063 mg/kg. The elements such as Fe, Mn, Cu and Na in the syrup are present in small volumes – from 1 to 144 mg/kg. In terms of the content of identified chemical elements and organoleptic characteristics, syrup from the sap of the Trautvetter maple differs from syrup from the Canadian sugar maple. The data obtained contribute to solving the tasks of estimating the reserves of potential food resources of mountain forests in Russia. The results of the study can be used to update regulatory documents in the forestry sector and implemented into training programs for forestry specialists.

Keywords: mountain forests, Trautvetter maple, sap productivity, maple syrup

Acknowledgements: All the analyses have been carried out in the Federal State Institution “North Ossetian Centre for Standardization, Metrology and Certification”.

For citation: Khetagurov Kh.M., Nikolaev I.A., Gryazkin A.V., Sattsaeva I.K., Thanh C.C. Sap Productivity of the High-Mountain Maple Stands in the North Caucasus. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 106–118. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-106-118>

Введение

Ресурсы леса активно применяются во многих странах мира [25, 26, 29–31, 34]. В число таких ресурсов входят недревесные лесные ресурсы, включая сок древесных растений. При этом предпринимаются попытки экономической оценки значения природных ресурсов [9, 12, 23, 24]. Например, в Канаде изучают недревесные лесные продукты, доступные для коренного населения [21], а в США организовано множество фирм по заготовке и переработке недревесных лесных ресурсов, в частности, число производителей кленового сиропа составляет примерно 4900 [22]. По мнению исследователей, вклад недревесных лесных продуктов в экономику с каждым годом возрастает. При оценке учитываются все виды ресурсов, депонированных в растительных сообществах [2, 9, 31, 33].

Для поддержки использования недревесных ресурсов леса с целью улучшения благосостояния местного населения в Канаде подписано соглашение по бореальным лесам. Соглашение в т. ч. регулирует заготовку дров гражданами для собственных нужд [9]. В рамках устойчивого лесопользования в США распространяется опыт вовлечения общественности в управление лесами. На базе учебно-опытного лесного хозяйства Йельского университета создана самоокупаемая лаборатория под открытым небом. В Швеции существует практика лесных экологических отелей [9].

Подсочка – использование растущих деревьев для получения сока и других продуктов. Извлекаемое сырье, включая сахаристые соки, обладает уникальными свойствами и находит применение во многих отраслях экономики, пополняя бюджеты всех уровней [2, 3, 7, 8, 26, 28, 29]. Основным товарным продуктом, производимым из сока древесных растений, – сироп.

Добыча сахаристых соков известна в России очень давно. Первые сведения об использовании соков лиственных пород встречаются в книгах Древней Руси. Уже в старину сахаристый сок древесных растений применяли для приготовления напитков и в лечебных целях [1, 8, 13].

В современных условиях получение сиропа возможно и посредством химических процессов. Например, S.S. Ram с сотрудниками синтезируют сироп с высоким содержанием фруктозы из крахмала или инулина с использованием ферментативных методов [32]. Способ производства фруктозных сиропов из инулина представлен в работе J. Anes, P. Fernandes [20]. Преимущество указанного способа заключается в 1-стадийности процесса (действие ферментов инулиназ высвобождает фруктозные единицы) и значительно более высоким выходе фруктозы – 95 %. Известно, что при гидролизе крахмала с применением амилолитических ферментов и последующей изомеризации получаемой декстрозы во фруктозу глюкоизомеразой выход фруктозы составляет всего 42 % [32].

Для получения сахаристых соков в подсочку вовлекается много видов древесных растений: пальма, береза, клен, орех и др. [16, 19, 27, 28, 33–35]. Сырьевая база подсочки в лесном фонде России представлена березняками и кленовниками, общая площадь которых – более 103 млн га. Сокопродуктивность березняков оценивается в 6–11 т/га за сезон, а кленовников – в 2 раза меньше. Подсочка березы и клена ведется в разных регионах России. Если березовые леса произрастают практически в каждом регионе России, то чистые по составу кленовники на большой площади встречаются лишь на Кавказе [1, 10, 11, 15, 16, 18]. В лесном фонде РФ одной из основных пород для заготовки сахаристого сока является клен высокогорный – *Acer Trautvetteri* Medw. [5, 14–19]. Чистые по составу древостои с кленом Траутветтера произрастают только на Кавказе [5, 6, 15–19].

До настоящего времени сырьевая база используется незначительно. Производство сиропа в России не развито по причине низкого содержания сахара в соке. Сахаристость березового сока составляет 0,8–1,1 %, а сока клена Траутветтера – 0,9–1,3 % [3, 4, 19]. Коэффициент применения потенциальных запасов составляет менее 0,04, т. е. не более 1 % от количества данного ресурса, в то время как древесный сахаристый сок – это экологически чистый, ежегодно возобновляемый продукт и его использование возможно расширить без нанесения вреда окружающей среде [4, 8].

Основной производитель кленового сиропа, поставляемого на мировой рынок, – Канада, после нее идут США [3, 9, 19, 28]. Натуральный кленовый сироп является наиболее распространенным продуктом, получаемым из сока клена сахарного (*Acer saccharum* Marshall). Сахаристость сока из деревьев этого вида значительно выше по сравнению с показателями для сока из березы и клена остролистного.

Характеристики сиропа зависят от технологии производства: выпаривание, вымораживание, вакуумная сублимационная сушка. Максимум полезных веществ в конечном продукте сохраняется при вымораживании сока. Однако это является самой трудоемкой технологией с длительным циклом. Вода кристаллизуется, а содержащиеся в соке вещества (сахара, кислоты и пр.) остаются в растворе. Концентрацию сахаров можно увеличивать при многократном вымораживании получаемого раствора.

Цель исследования – оценка интенсивности соковыделения и сокопродуктивности *Acer Trautvetteri* Medw., произрастающего на северных макросклонах Кавказа, и определение основных характеристик получаемого кленового сиропа.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – кленовник на нижней границе вертикального пояса распространения клена Траутветтера, или клен высокогорный (*Acer Trautvetteri* Medw.). Кленовник произрастает на Северном Кавказе, урочище Кобань, и входит в лесной фонд Республики Северной Осетии–Алании. Координаты объекта исследования: 42°56,352 с. ш., 44°29,677 в. д. Высота объекта над уровнем моря составляет 1374–1398 м, крутизна склона северной экспозиции – 30–35°. Температура воздуха днем в период соковыделения изменялась в пределах от 6 до 15 °С, температура почвы на глубине 5 см была 5–9 °С, на глубине 10 см – 3–7 °С. Уровень радиации – 17–21 мкЗв/ч. Измерение температуры проводили электронным термометром ТЕ 113. Радиационный фон установлен с использованием профессионального радиометра «Эколог мини».

Запас древесины на объекте исследования составляет 157 м³/га. В состав древостоя входит клен Траутветтера, занимая по запасу древесины 91 %. Класс бонитета древостоя – V. Средний возраст деревьев клена – более 100 лет. Средняя высота древостоя – около 15 м. Почти все крупные деревья клена являются многоствольными и имеют раскидистую крону.

В весенний период до начала распускания почек клен Траутветтера выделяется из полога древостоя красноватым цветом (рис. 1). Учитывая эту особенность клена Траутветтера можно довольно точно выделять на склонах гор массивы высокогорных кленовников в начале вегетационного периода.

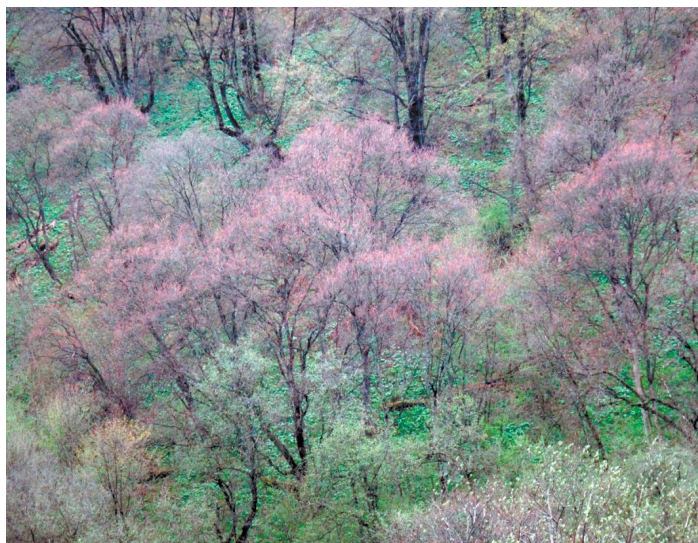


Рис. 1. Кроны клена Траутветтера в начале вегетации

Fig. 1. The crowns of Trautvetter maple trees at the beginning of the growing season

Выюкгорные кленовники произрастают только на северных склонах и достигают вершины водораздельных хребтов (рис. 2). Ближе к вершинам хребтов клен Траутветтера приобретает кустарниковую форму. Высота деревьев в этом случае не превышает 5 м, древостои являются чистыми по составу.



Рис. 2. Чистые по составу кленовики на верхней границе распространения

Fig. 2. The pure maple stands at the upper limit of their distribution

Для исследовательских целей подсочку клена Траутветтера проводили в течение нескольких сезонов. Заготовку кленового сока осуществляли закрытым способом в апреле–мае [3, 17]. Технология подсочки включает в себя следующие этапы:

- подрумянивание коры на площади около 10 см²;
- бурение подсочных каналов диаметром 10 мм на глубину 3–4 см;
- заложение каналов диаметром 10 мм на расстоянии 30–40 см от корневой шейки;
- установка сокопроводов (полихлорвиниловая трубка диаметром 10 мм);
- оборудование сокоприемников (емкости разной вместимости в зависимости от интенсивности соковыделения);
- сбор сока и измерение его объема через каждые 2 ч с точностью до 5 мл;
- демонтаж подсочного оборудования и закупорка подсочных каналов (деревянные заглушки).

Подсочные каналы закладывали на 42 деревьях клена Траутветтера разного возраста. Диаметр стволов – от 30 до 130 см. Деревья с большим диаметром ствола, как правило, являются дуплистыми (8 деревьев из 42). Дупла имеют диаметр до 50 см, протяженность – более 3 м.

По интенсивности соковыделения все деревья, вовлеченные в подсочку, были разделены на следующие группы: деревья с высокой интенсивностью соковыделения (более 120 мл/ч); средней (60–120 мл/ч); низкой (до 60 мл/ч).

Анализ образцов сока и сиропа проводили в лабораторных условиях по стандартизированным методикам. Пробы сока на анализ доставлены в лабораторию в день отбора.

Сироп из кленового сока получали методом выпаривания в эмалированной таре вместимостью 20 л. Площадь поверхности, с которой происходит испарение влаги, составляет 0,1256 м². Концентрацию сахаров в процессе выпаривания доводили до 67 %.

Для определения необходимых характеристик сиропа применяли метод высокоэффективной жидкостной хроматографии в изократическом (т. е. при постоянном составе элюента – подвижной фазы) и градиентном режимах (т. е. при изменении состава подвижной фазы в ходе хроматографического цикла по определенной программе). Химический состав сиропа, содержание ор-

ганических и неорганических компонентов устанавливали с использованием жидкостного хроматографа «Маэстро» со спектрофотометрическим и рефрактометрическим детекторами.

Количественный анализ элементного состава по атомным спектрам поглощения осуществлялся на атомно-абсорбционном спектрометре Contra AA 800 с пламенным и электротермическим атомизаторами. Уровень светопропускания сиропа определяли спектрометром при длине волны 560 нм с учетом опыта других исследователей [28].

Результаты исследования и их обсуждение

Кленовник на объекте исследования характеризуется практически чистым по составу древостоем. Доля других пород – менее 10 %: 92Кл_т3Кл 2Ол2Я1В (Кл_т – клен Траутветтера, Кл – клен остролистный, Ол – ольха черная, Я – ясень обыкновенный, В – вяз шершавый). Преобладают старовозрастные деревья клена Траутветтера. Диаметр стволов самых крупных экземпляров превышает 110 см при среднем показателе 46 см. Максимальная высота деревьев не более 16 м, средняя – 14,3 м. Абсолютная полнота – 25,5 м²/га. Сомкнутость крон – 76 %. Большинство деревьев произрастает гнездами от 2 до 4 стволов в 1 гнезде (общая корневая система). Все деревья имеют раскидистую крону – до 18 м в диаметре. Этим и объясняется небольшая численность деревьев на единице площади – 132 экз./га.

Тип леса объекта исследования – кленовик-разнотравный. Представлены все компоненты лесного фитоценоза – древостой, подрост, подлесок и живой напочвенный покров (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики компонентов фитоценоза кленовика на объекте исследования The main characteristics of the components of phytocenosis of the maple stand at the research site

Показатель	Древостой	Подрост	Подлесок	Травостой
Количество видов	7	8	11	62
Численность, тыс./га	0,132	1,22	4,19	–
Средняя высота, м	12,9±0,4	1,6±0,4	1,1±0,2	0,63±0,17
Сомкнутость крон, проективное покрытие, %	91	–	27	84

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что флористический состав всех компонентов фитоценоза характеризуется большим разнообразием. Всего на опытном участке исследуемого кленовика выявлено 88 видов сосудистых растений.

Начало сокодвижения, как правило, приходится на разные декады апреля. Начало, продолжительность и окончание соковыделения изменяются по годам и зависят от погодных условий апреля. При достижении среднесуточной температуры +3–5 °С выделяется сок, что продолжается 2–3 недели в зависимости от температуры воздуха. Чем она выше, тем быстрее прекращается соковыделение. Признак окончания этого процесса – сбраживание сока.

Интенсивность соковыделения изменяется в течение всего периода подсочки. В целом она ежедневно снижается. Резкое уменьшение количества сока наблюдается в 1-е часы после начала подсочки. В последующие сутки происходит более плавное снижение. При этом наблюдаются существенные колебания интенсивности на протяжении суток – в дневное время она выше, в ночное – падает.

Средняя интенсивность соковыделения в дневное время составляет $83,3 \pm 7,2$ мл/ч. За сутки с 1 подсочного канала получается в среднем $1,41 \pm 0,11$ л сока. Общая сокопродуктивность данного кленовника оценивается примерно в 4 тыс. л с 1 га.

Минимальная интенсивность соковыделения составила 80 мл/ч, максимальная – 725 мл/ч (табл. 2).

Таблица 2

**Основные статистические показатели для интенсивности соковыделения
исследованных деревьев клена**
**The main statistical indicators for the intensity of sap secretion
by the studied maple trees**

Показатель	Все деревья	Деревья с дуплистым стволом
Интенсивность соковыделения, мл/ч	283,8	317,1
Выборочное среднеквадратичное отклонение	205,90	296,53
Фактический коэффициент вариации, %	72,57	93,51
Ошибка репрезентативности среднего значения	29,41	30,42
Точность наблюдений, %	10,37	9,59

Примечание: 34 дерева без дупла в стволе, 8 деревьев с дуплом.

Фактический коэффициент вариации превышает 31 % в обоих случаях, т. е. в выборках наблюдается очень большой разброс значений. Точность наблюдений удовлетворительная ($6 \% < P < 11 \%$) для всех деревьев и деревьев с дуплами, что подтверждает достоверность полученных результатов.

С учетом продолжительности соковыделения и средней сокопродуктивности деревьев клена, можно констатировать, что 1 га кленовников способен дать до 4 т натурального древесного сока за 1 подсочный сезон.

За 3 года опытной подсочки было проанализировано 30 проб кленового сока. По кислотности сока (в пересчете на яблочную кислоту) разброс значений составляет от 0,00025 до 0,00034 % (среднее – $0,0002797 \pm 0,000022$ %). Гидролитическая кислотность – 0,09–0,11 мл/100 мл. Массовая доля сухих растворимых веществ (сахаров) – от 0,70 до 1,80 % (среднее – $1,273 \pm 0,083$ %). Сахара представлены фруктозой, лактозой и мальтозой (в незначительных количествах), а также глюкозой и сахарозой – 1,68; 39,16 г/100 г соответственно.



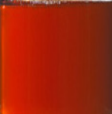
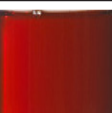

В составе кленового сиропа выявлены следующие элементы: Fe – 0,74; Mn – 144,3; Cu – 0,46; Na – 72,79; Ca – 1286; K – 9063 мг/кг. Обнаружены также витамины A, B₂, C – 0,001; 9,562; 3,321 мг/100 г.

Доля живых дрожжевых клеток в сиропе не превышает 11 КОЕ, при допустимом значении 50 КОЕ [6]. Энергетическая ценность продукта составляет 1099 кДж/100 г.

Для сиропа определено светопропускание. При длине волны 560 нм показатель равняется 60,94 %. По международной классификации, полученный нами продукт относится к светлому типу сиропов, для которых светопропускание находится в пределах от 60,5 до 74,0 % (табл. 3).

Таблица 3

**Классификация кленового сока по светопропусканию
и вкусовым оттенкам, используемая в Канаде [21, 26, 28]
The maple sap classification by light transmittance and flavour
used in Canada [21, 26, 28]**

	Класс 1. Экстрасветлый. Светопропускание более 75 %. Сироп имеет нежно-золотистый цвет, мягкий и тонкий вкус клена
	Класс 1. Светлый. Светопропускание между 60,5 и 74,0 %, золотистый цвет, мягкий и сладкий вкус клена
	Класс 1. Средний. Светопропускание между 44 и 60,4 %, темный цвет, деликатный и сладкий вкус клена. Это типичный кленовый сироп, который используют в кулинарии
	Класс 2. Темный. Светопропускание между 27,0 и 43,9 %, цвет темный, сильный и резко выраженный вкус клена. Употребляется в чистом виде, для выпечки и приготовления блюд
	Класс 3. Темный. Светопропускание менее 26,9 %, имеет очень темный цвет, очень сильный карамельный вкус клена. Используется только в качестве ингредиентов в пищевой промышленности

Темный кленовый сироп имеет повышенную насыщенность вкуса, светлый – пониженную. Класс сиропа зависит, прежде всего, от времени сбора кленового сока. Для получения светлого сиропа сок собирается в самом начале сезона соковыделения, тогда как сбор сока для получения более темного сиропа осуществляется позднее.

Для оценки вкусовых качеств сиропа и внешних характеристик была проведена публичная дегустация продукта на кафедре анатомии, физиологии и ботаники Северо-Осетинского государственного университета имени К.Л. Хетагурова. В дегустации приняли участие журналисты и жители города. Анкету заполнили 18 человек.

При дегустации сравнивали 2 продукта – кленовый сироп канадской фирмы Coombs family farms и кленовый сироп собственного производства (табл. 4).

Таблица 4

**Результаты дегустации кленовых сиропов*
The results of maple syrup tasting**

Сироп	Внешний вид	Цвет	Аромат	Консистенция	Вкус	Итого
Канадский	4,33	4,83	4,66	4,77	4,76	23,35
Собственного производства	4,38	4,41	3,88	4,00	4,03	20,70

*Средняя оценка продукта по 5-балльной шкале: 5 баллов – отличное качество; 4 – хорошее; 3 – удовлетворительное; 2 – плохое; 1 – очень плохое.

По 5-балльной шкале сироп из сока клена Траутветтера по большинству показателей выше 4 баллов, за исключением аромата. Следовательно, этот продукт соответствует международным стандартам. Здесь нужно отдельно отметить, что методика определения запаха в каждом случае своя. Единых требований нет.

Заключение

Сок высокогорных кленовников, представленных в основном кленом Траутветтера, Северного Кавказа – ценный продукт для пищевой промышленности, фармакологии и сельского хозяйства. Интенсивность соковыделения варьирует в широких пределах – от 80 до 725 мл/ч. Сокопродуктивность в среднем составляет около 4 тыс. л/га за сезон. Доля сахаров в соке – 0,70–1,80 % с изменениями по годам. Сахара представлены фруктозой и глюкозой в соотношении 1 : 23. В целом кленовый сироп из сока клена Траутветтера отличается от сиропа из сока клена сахарного, произрастающего в Канаде. По всем показателям сироп из сока клена Траутветтера хотя и незначительно, но уступает сиропу из сока клена сахаристого.

Кленовый сок и сироп – пищевые ресурсы горных лесов России. По международной классификации сироп из сока клена Траутветтера относится к светлomu типу, пропускание света равно 60,94 %.

Полученные результаты могут быть использованы при обновлении нормативных документов по лесопользованию и внедрены в учебные программы по подготовке специалистов лесного профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Виноградов-Никитин П.З. Добыча кленового сока и сахара в Боржоми // Тр. по приклад. ботанике, генетике и селекции. 1929. Т. 20. С. 8–12.
Vinogradov-Nikitin P.Z. Maple Sap and Sugar Extraction in Borjomi. *Trudy po prikladnoj botanike, genetike i selektsii*, 1929, vol. 20, pp. 8–12. (In Russ.).
2. Гордиенко В.А., Солнцев Г.К. Лесные пользования на Северном Кавказе // Федеральн. служба лесн. хоз-ва России. М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. 472 с.
Gordienko V.A., Solntsev G.K. *Forest Uses in the North Caucasus*. Moscow, Federal Service for Forestry of the Russian Federation, All-Russian Scientific Research Information Centre “Lesresurs”, 1999. 472 p. (In Russ.).
3. Грязькин А.В. Недревесная продукция леса. СПб.: Лань, 2021. 248 с.
Gryazkin A.V. *Non-Timber Forest Products*. St. Petersburg, Lan’ Publ., 2021. 248 p. (In Russ.).
4. Грязькин А.В., Данилов Д.А., Зайцев Д.А., Хоанг Минь Ань, Тхань Чанг Чун. Регуляция соковыделения при подсочке березы *Betula pendula* Roth. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 180–189.
Gryazkin A.V., Danilov D.A., Zaytsev D.A., Hoang M.A., Thanh T.T. Regulation of Sap Release when Tapping *Betula pendula* Roth. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 180–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-180-189>
5. Зернов А.С. Флора Северо-Западного Кавказа. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2022. 665 с.
Zernov A.S. *Flora of the North-West Caucasus*. Moscow, KMK Publ. House, 2022. 665 p. (In Russ.).
6. Меледина Т.В., Давыденко С.Г., Васильева Л.М. Физиологическое состояние дрожжей. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. 48 с.

Meledina T.V., Davydenko S.G., Vasil'eva L.M. *Physiological State of Yeast*. St. Petersburg, ITMO University, Institute of Refrigeration and Biotechnology, 2013. 48 p. (In Russ.).

7. Мурдалов М.М. Кавказская Швейцария. Chechnya. Издательские решения, 2020. 725 с.

Murdalov M.M. *Caucasian Switzerland*. Chechnya. Izdatel'skie resheniya Publ., 2020. 725 p. (In Russ.).

8. Обозов Н.А. Организация побочных пользований и специализированных хозяйств. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 355 с.

Obozov N.A. *Organization of Secondary Uses and Specialized Farms*. Moscow, Leshnaya Promyshlennost' Publ., 1986. 355 p. (In Russ.).

9. Примеры зарубежного опыта устойчивого лесопользования и лесопользования: сб. ст. / под общ. ред. Н. Шматкова; Всемирный фонд дикой природы (WWF). М., 2012. 180 с.

Examples of International Experience in Sustainable Forest Management and Forest Exploitation: Collection of Articles. Ed. by N. Shmatkov. Moscow, World Wildlife Fund (WWF), 2012. 180 p. (In Russ.).

10. Природные ресурсы Республики Северная Осетия-Алания: в 18 т. Растительный мир. Владикавказ: Проект-Пресс, 2000. 544 с.

Natural Resources of the Republic of North Ossetia-Alania: in 18 vols. Plant Life. Vladikavkaz, Proekt-Press, 2000. 544 p. (In Russ.).

11. Соколовский И.О., Рахтеенко И.Н. Подсочка клена остролистного (*Acer platanoides*) в Белоруссии // Сб. тр. ЦНИИЛХ. 1936. № 4. С. 32–52.

Sokolovskij I.O., Rakhteenko I.N. Tapping of Norway Maple (*Acer platanoides*) in Belarus. *Collection of Works of the Central Research Institute of Forestry*, 1936, no. 4, pp. 32–52. (In Russ.).

12. Ткаченко К.Г. Комплементарные методы изучения ресурсных видов растений в полевых и стационарных условиях // Полевой журн. биолога. 2021. Т. 3, № 1. С. 74–86.

Tkachenko K.G. Complementary Methods for Studying Resource Plant Species in Field and Stationary Conditions. *Polevoj zhurnal biologa* = Field Biologist Journal, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 74–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.52575/2658-3453-2021-3-1-74-86>

13. Труды Вольного Экономического Общества к поощрению в России земледелия и домостроительства. СПб.: Типография императорского Воспитательного дома, 1766. Ч. 2. 333 с.

Works of the Free Economic Society for the Encouragement of Agriculture and House Building in Russia. St. Petersburg, Printing House of the Imperial Foundling Hospital, 1766, part 2. 333 p. (In Russ.).

14. Фирсов Г.А., Ткаченко К.Г., Трофимова А.С. Клены (*Acer* L.) Ботанического сада Петра Великого Ботанического института им. В.Л. Комарова Российской академии наук // Полевой журн. биолога. 2021. Т. 3, № 4. С. 357–369.

Firsov G.A., Tkachenko K.G., Trofimova A.S. Species of *Acer* L. Genus at Peter the Great Botanic Garden of Komarov Botanical Institute of Russian Academy of Sciences. *Polevoj zhurnal biologa* = Field Biologist Journal, 2021, vol. 3, no. 4, pp. 357–369. (In Russ.). <https://doi.org/10.52575/2712-9047-2021-3-4-357-369>

15. Хетагуров Х.М. Структурная организация и ресурсы высокогорных кленов центрального Кавказа: дис. ... д-ра биол. наук. Владикавказ, 2019. 326 с.

Khetagurov Kh.M. *Structural Organization and Resources of High-Mountain Maple Forests of the Central Caucasus*: Dr. Biol. Sci. Diss. Vladikavkaz, 2019. 326 p. (In Russ.).

16. Хетагуров Х.М., Базаев А.Б., Грязькин А.В., Тигиев С.Е. Сокопродуктивность *Acer trautvetteri* Medw. в условиях Северной Осетии // Аграр. науч. журн. 2013. № 5. С. 45–48.

Khetagurov Kh.M., Bazaev A.B., Gryazkin A.V., Tigiev S.E. Sap Productivity of *Acer trautvetteri* Medw. in the Conditions of North Ossetia. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal, 2013, no. 5, pp. 45–48. (In Russ.).

17. Хетагуров Х.М., Грязькин А.В. Высокогорные кленовики Северной Осетии. СПб.: Наука, 2013. 146 с.

Khetagurov Kh.M., Gryazkin A.V. *High-Mountain Maple Stands of North Ossetia*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2013. 146 p. (In Russ.).

18. Хетагуров Х.М., Николаев И.А., Базаев А.Б. Клен Траутветтера в РСО–Алания // Изв. Горск. гос. аграрн. ун-та. 2014. Т. 51, № 2. С. 284–289.

Khetagurov Kh.M., Nikolaev I.A., Bazaev A.B. Trautvetter Maple in the Republic of North Ossetia–Alania. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Proceedings of Gorsky State Agrarian University, 2014, vol. 51, no. 2, pp. 284–289. (In Russ.).

19. Хетагуров Х.М., Николаев И.А., Грязькин А.В., Базаев А.Б. Сокопродуктивность клена высокогорного // Изв. Горск. гос. аграрн. ун-та. 2024. Т. 61-2. С. 115–123.

Khetagurov Kh.M., Nikolaev I.A., Gryazkin A.V., Bazaev A.B. Sap Productivity of Redwood Maple. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Proceedings of Gorsky State Agrarian University, 2024, vol. 61-2, pp. 115–123. (In Russ.).

https://doi.org/10.54258/20701047_2024_61_2_115

20. Anes J., Fernandes P. Towards the Continuous Production of Fructose Syrups from Inulin Using Inulinase Entrapped in PVA-Based Particles. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 3, iss. 4, 2014, pp. 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.11.006>

21. Boxall P.C., Murray G., Unterschultz J.R. Non-Timber Forest Products from the Canadian Boreal Forest: an Exploration of Aboriginal Opportunities. *Journal of Forest Economics*, 2003, vol. 9, no. 2, pp. 75–96. <https://doi.org/10.1078/1104-6899-00027>

22. Ciesla W.M. *Non-Wood Forest Products from Temperate Broad-Leaved Trees*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002. 125 p.

23. Cherniavskih V.I., Sidelnikov N.I., Dumacheva E.V., Borodaeva Z.A., Glubsheva T.N., Gorbacheva A.A., Vorobyova O.V., Korolkova S. Biological Resources of Natural Forage Grassland of the Cretaceous South of the European Russia. *EurAsian Journal of Bio-Sciences*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 845–849.

24. Dumacheva E.V., Cherniavskih V.I., Markova E.I., Filatov S.V., Tokhtar V.K., Tokhtar L.A., Pogrebnyak T.A., Horolskaya E.N., Gorbacheva A.A., Vorobyova O.V., Glubsheva T.N. Biological Resources of the *Hyssopus* L. on the South of European Russia and Prospects of its Introduction. *International Journal of Green Pharmacy (Supplementary Issue)*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 476–480.

25. Gelderen van D.M., Jong de P.C., Oterdoom H.J. *Maples of The World*. Oregon, Portland, Timber Press, 1994. 458 p.

26. *Global Forest Resources Assessment. FAO Forestry Paper 140*. Rome, Food and Agriculture Organization, 2001. 479 p.

27. Lund H.G., Pajari B., Korhonen M. (eds.) The Non-Wood Forest Resources Mystery. *Sustainable Development of Non-Wood Goods and Benefits from Boreal and Cold Temperate Forests: Proceedings of the Workshop*, 1998, pp. 32–44.

28. N'guyen G.Q., Martin N., Jain M., Lagacé L., Landry C.R., Filteau M. A Systems Biology Approach to Explore the Impact of Maple Tree Dormancy Release on Sap Variation and Maple Syrup Quality. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, art. no. 14658.

<https://doi.org/10.1038/s41598-018-32940-y>

29. *Non-Wood News*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006. 97 p.

30. Nygren A., Lacuna-Richman C., Keinänen K., Alsa L. Ecological, Socio-Cultural, Economic and Political Factors Influencing the Contribution of Non-Timber Forest Products to Local Livelihoods: Case Studies from Honduras and the Philippines. *Small-Scale Forest Economics, Management and Policy*, 2006, vol. 5, pp. 249–269.

<https://doi.org/10.1007/s11842-006-0013-5>

31. Mahapatra A.K., Tewari D.D. Importance of Non-Timber Forest Products in the Economic Valuation of Dry Deciduous Forests of India. *Forest Policy and Economics*, 2005, vol. 7, iss. 3, pp. 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2004.02.002>

32. Singh R.S., Chauhan K., Singh R.P. Enzymatic Approaches for the Synthesis of High Fructose Syrup. *Plant Biotechnology: Recent Advancements and Developments*. Singapore, Springer, 2017, pp. 189–211. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4732-9_10

33. Wong J.L.G., Thornber K., Baker N. *Resource Assessment of Non-Wood Forest Products: Experience and Biometric Principles*. Rome, FAO Technical Papers, 2001, no. 13. 109 p.

34. *World Forestry Congress (WFC) Side Event. Strengthening Global Part to Advance Sustainable Development of Non-Wood Forest Products, Held in Canada on 20 September 2003*. “Frontline Express” (Canadian Forest Service, Great Lakes Forestry Center), 2003, bulletin no. 28. Available at: <https://www.sfp.forprod.vt.edu/discussion/> (accessed 15.09.24).

35. Zakharenkov A., Lloyd S. Country Dcompass Russian Far East. *FAO an Information Bulletin on Non Wood Forest Products “Non Wood News”*, 1997. 36 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Original article

УДК 630.674(531.754)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-119-130

The Results of Experimental Studies of the Apparent Density of Wood

Renat Kh. Gainullin¹, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [MIQ-8343-2025](https://orcid.org/0000-0002-2492-8861),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>

Ruslan R. Safin², *Doctor of Engineering, Prof.*; ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Albina V. Safina², *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [CAA-1333-2022](https://orcid.org/0000-0002-7344-9242),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>

Rishat Kh. Gainullin¹, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [MIT-0804-2025](https://orcid.org/0000-0003-2219-2413),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>

Ekaterina M. Tsvetkova¹, *Postgraduate Student*; ResearcherID: [MIQ-9779-2025](https://orcid.org/0000-0002-5664-5866),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>

¹Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; gainyullinrh@yandex.ru, rishat_000@mail.ru, Ekaterinadudina@mail.ru

²Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; cfaby@mail.ru, alb_saf@mail.ru

Received on April 14, 2025 / Approved after reviewing on June 26, 2025 / Accepted on June 27, 2025

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the apparent density of wood obtained under various operating modes of the pneumatic measurement system. A new technique and experimental unit have been used for the research to determine the apparent volume of porous bodies in an atmospheric air environment. For the experiments, samples of aspen, spruce, birch, pine and oak wood taken from the sapwood of tree stems have been used. The functional stability of the developed method for determining the apparent volume of porous bodies has been experimentally confirmed. Using the developed experimental unit, the apparent volumes have been measured and apparent densities of wood samples of various species have been calculated under conditions of overpressure and underpressure of the system operation. In the overpressure mode, the pneumatic system has operated at +70 and +90 kPa, and in the underpressure one at –70 and –90 kPa, respectively. It has been experimentally established that when operating the measurement system in the underpressure mode, the apparent density of wood is higher than in the overpressure mode. The values of apparent densities determined in the underpressure mode vary within the range of 1.361 to 1.434 g/cm³ for aspen, 1.151 to 1.348 g/cm³ for spruce, 1.356 to 1.402 g/cm³ for birch, 1.298 to 1.444 g/cm³ for pine and 0.99 to 1.147 g/cm³ for oak. The corresponding values of apparent densities determined in the overpressure mode have been 1.316 to 1.372 g/cm³ for aspen, 1.106 to 1.274 g/cm³ for spruce, 1.292 to 1.356 g/cm³ for birch, 1.285 to 1.412 g/cm³ for pine and 0.904 to 1.138 g/cm³ for oak. Thus, the hypothesis about the priority of applying the underpressure mode when determining the apparent volume of porous bodies in the atmospheric air environment has been confirmed. The magnitude of the largest deviation between the highest and lowest values of apparent density when determined in different modes has been, re-



spectively: for aspen – 6.83 %, for spruce – 8.54 %, for birch – 6.35 %, for pine – 6.82 % and for oak – 3.91 %. The magnitude of the largest deviation between the maximum values of apparent density and the generally accepted value of 1.46 g/cm³ have been, respectively: for aspen – 1.78 %, for spruce – 7.67 %, for birch – 3.97 %, for pine – 1.1 % and for oak – 21.44 %.

Keywords: wood, apparent density, measurement system, measurement modes, overpressure, underpressure

For citation: Gainullin Ren.Kh., Safin R.R., Safina A.V., Gainullin Rish.Kh., Tsetkova E.M. The Results of Experimental Studies of the Apparent Density of Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 119–130.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-119-130>

Научная статья

Результаты экспериментальных исследований кажущейся плотности древесины

Рен.Х. Гайнуллин^{1✉}, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [MIQ-8343-2025](https://orcid.org/0000-0002-2492-8861),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2492-8861>

Р.Р. Сафин², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

А.В. Сафина², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [CAA-1333-2022](https://orcid.org/0000-0002-7344-9242),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-9242>

Риш.Х. Гайнуллин¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [MIT-0804-2025](https://orcid.org/0000-0003-2219-2413),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2219-2413>

Е.М. Цветкова¹, аспирант; ResearcherID: [MIQ-9779-2025](https://orcid.org/0000-0002-5664-5866),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5664-5866>

¹Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; gainullinrh@yandex.ru✉, rishat_000@mail.ru, Ekaterinadudina@mail.ru

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; cfaby@mail.ru, alb_saf@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.25 / Одобрена после рецензирования 26.06.25 / Принята к печати 27.06.25

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований кажущейся плотности древесины, полученные при различных режимах функционирования пневматической системы измерения. Использовали новую методику и экспериментальную установку для определения кажущегося объема пористых тел в среде атмосферного воздуха. Образцы древесины отбирали из заболонной части стволов осины, ели, березы, сосны и дуба. Экспериментально подтверждена практическая пригодность предложенного метода. С помощью разработанной экспериментальной установки измерены кажущиеся объемы и рассчитаны кажущиеся плотности древесных заготовок различных пород при режимах избыточного давления и разрежения функционирования системы. В режиме избыточного давления пневматическая система работала при +70 и +90 кПа, а в режиме разрежения – при –70 и –90 кПа. Экспериментально установлено, что при эксплуатации измерительной системы в режиме разрежения кажущаяся плотность древесины выше, чем при эксплуатации системы в режиме избыточного давления. Кажущаяся плотность, определенная в режиме разрежения, изменяется в пределах

1,361–1,434 г/см³ для осины, 1,151–1,348 г/см³ для ели, 1,356–1,402 г/см³ для березы, 1,298–1,444 г/см³ для сосны, 0,99–1,147 г/см³ для дуба. Кажущаяся плотность, установленная в режиме избыточного давления, составила 1,316–1,372 г/см³ для осины, 1,106–1,274 г/см³ для ели, 1,292–1,356 г/см³ для березы, 1,285–1,412 г/см³ для сосны, 0,904–1,138 г/см³ для дуба. Таким образом, подтверждается гипотеза о приоритете применения режима разрежения при измерении кажущегося объема пористых тел в среде атмосферного воздуха. Наибольшее отклонение между максимальной и минимальной кажущимися плотностями при разных режимах составило: осина – 6,83 %, ель – 8,54 %, береза – 6,35 %, сосна – 6,82 %, дуб – 3,91 %. Наибольшая разница между максимальной кажущейся плотностью и общепринятой 1,46 г/см³ равнялась: осина – 1,78 %, ель – 7,67 %, береза – 3,97 %, сосна – 1,1 %, дуб – 21,44 %.

Ключевые слова: древесина, кажущаяся плотность, измерительная система, режимы измерения, избыточное давление, разрежение

Для цитирования: Gainullin Ren.Kh., Safin R.R., Safina A.V., Gainullin Rish.Kh., Tsetkova E.M. The Results of Experimental Studies of the Apparent Density of Wood // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 119–130. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-119-130>

Introduction

All the materials used by people in their everyday life have different physical and mechanical properties. The most common and universal physical quantity used for characterizing the properties of a material is its density. However, the density of the same material may vary within a great range. This is true for porous materials whose density may be described as average and true. Wood with various types of density also belongs to porous materials [12]. Generally, the technological calculation practice applies a value of the average density of wood. However, this value varies within a great range not only for the same species but also for the same tree [14]. It should be noted that the most precise measure of wood content in the volume unit of a material is the true density of wood. In wood science, it is called wood substance density [23]. Currently, it is generally accepted that the wood substance density is 1.53 g/cm³. Wood is a capillary-porous material of plant origin, consisting of cell walls, which is why the concept of cell wall density is used in wood science. In his work O.I. Poluboyarinov [16] notes that the density of cell walls and the density of wood matter differ by approximately 10 %. This discrepancy indicates the presence of a significant volume of micropores (second-order pores) in the cell walls. In addition to the true density and the density of the cell walls, foreign authors are also using the concept of an apparent density of wood. The apparent density is the ratio of the mass of a sample to its volume, including the volume of closed pores (if any), and excluding the volume of open pores and cavities between the particles of the sample in a bulk material. In our understanding, if there are no closed pores in the wood samples being studied, the apparent density will be equal to the density of the cell walls.

One of the earliest methods of measuring the true density of wood is the suspension method [5, 8, 19]. According to this method, prepared wood samples are inserted into solutions of different salts. After the wood gets saturated, the solution density is adjusted so that the samples are suspended in the solution. It indicates that the densities of the solution and the wood sample are equal. Consequently, the wood density can be defined by a numerical value of the solution density. The above mentioned researchers have carried out the experiments and obtained the wood density

values from 1.4 to 1.56 g/cm³ depending on the species. It should be noted that this method takes significant amounts of time and labour, therefore nowadays it is used rather seldom.

In the beginning of the 20th century, the pycnometry method has started being used for measuring the density of a material. This method can be summarized as follows: a body immersed in any medium displaces from it a volume which is equal to the volume of this body. Such liquids as water, alcohol, petrol, toluene, etc. and gases like helium, oxygen, nitrogen, hydrogen, etc. have been used as displacement media [1, 2, 18, 20, 22]. The numerical values of density obtained by the pycnometry method have varied depending on the medium used. So, the density measured in water has been on average 1.54 g/cm³, while that one measured in the gas medium has been 1.46 g/cm³.

Another method of measuring the cell-wall density of wood, the mercury porosimetry method, is similar in concept but different in its procedure. In this case, mercury is discharged into the pores of wood under high pressure [13, 15, 21]. The density measured via this method is about 1.43 g/cm³. This method cannot become common due to the toxicity of mercury and to the fact that the wood samples cannot be used for further research as well as in the case of applying the suspension method because such samples contain mercury and salts.

The above mentioned methods of measuring the cell-wall density are classified as direct methods. In addition to them, there is one more indirect method, which is the optical (planimetric) method. It helps define the cell-wall density value by the relation of the density of the whole volume of wood and the percentage content of cell walls in a measured sample. To apply this method, a microsection of wood is made, and then its weight, dimensions, and average density are measured. After that, its image is zoomed by a microscope, and the area taken by cell walls in the area of the whole section is measured by a planimeter [3, 7, 10, 17, 24]. According to the experimental data obtained, the cell-wall density measured by the planimetric method is within 1.02 to 1.30 g/cm³ for various wood species. At the present time, this method is improved due to the use of radiography and computer tomography [11] for producing high resolution images of a wood microsection.

Nowadays, among the above mentioned methods of measuring the cell-wall density, the most commonly applied method is the helium pycnometry standardized by many countries of the world [4, 9]. Beside its advantages, this method also has its drawbacks which could include the requirement to helium grade and the necessity for a multi-stage calibration procedure to be implemented only in the overpressure mode of a measurement pneumosystem.

Currently, the researchers show less and less interest for the investigations of the cell-wall density of wood. First of all, it can be explained by the difficulty of developing new methods for measuring the cell-wall density of wood. The second important factor is that certain amount of knowledge about this value has already been accumulated. Nevertheless, modern science needs new methods and approaches in order to gain new knowledge in this field. Moreover, an essential issue is the equality of the cell-wall density of wood and its apparent density.

This paper presents 2 interconnected aspects. Firstly, an alternative method of gas pycnometry using the atmospheric air instead of helium as a measurement medium has been proposed and tested. Secondly, the comparative data on the cell-wall density and the apparent density of various species have been presented.

Research Objects and Methods

In order to eliminate the shortcomings of the existing method of gas pycnometry, the authors have proposed an alternative technique of measuring the apparent density of wood [6]. This method applies the atmospheric air instead of helium in a pneumatic measurement system. For experimental studies, we have developed a unit (Fig. 1) consisting of 2 cylinders 1, 6 of equal capacities, valves 3, 4, 5, 12, a pneumatic pump 13 with a manometer 14 and a relief valve 15, cylinders 11 containing water and series-connected with the unit by transparent pipe lines 9, 10 with scales 7, 8. The volume and density of porous bodies can be measured via this method when the measurement system operates in the overpressure and underpressure modes.

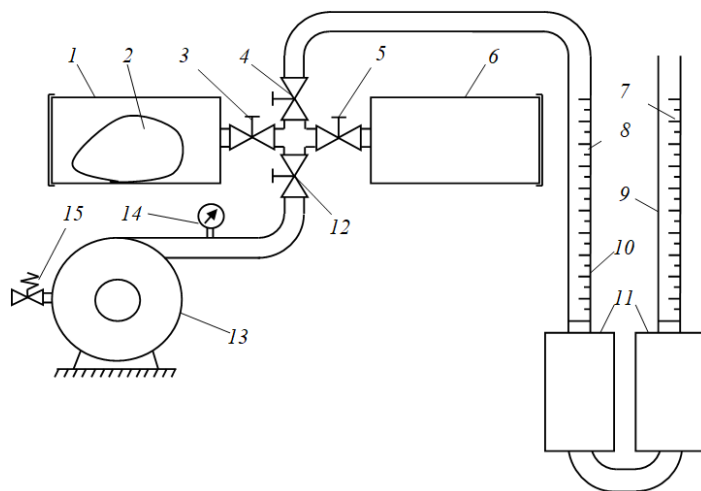


Fig. 1. The experimental unit diagram: 1 – sample cylinder;
2 – measured sample; 3, 4, 5, 12 – valves; 6 – measuring cylinder; 7, 8 – scales;
9, 10 – transparent pipe lines; 11 – water cylinders; 13 – pneumatic pump;
14 – manometer; 15 – relief valve

In the underpressure mode the unit operates as follows. The sample 2 weighted on the weighing balance is placed into the sample cylinder 1 while the valves 3, 4, 5, 12 are opened and the cylinders 1 and 6 have the P_{atm} atmospheric pressure set. After that, the valve 4 is closed and the pneumatic pump 13 is turned on. The pneumatic pump 13 creates in the cylinders 1 and 6 the P_1 underpressure recorded by the manometer 14. When the desired value of underpressure is reached, the valve 12 is closed as well as further the valves 3 and 5, and the pressure in the pneumatic pump 13 is equilibrated with the atmospheric pressure through the relief valve 15. After the valves 3 and 4 are successively opened, due to the underpressure the Δh_1 height of water column in the transparent pipe line 10 changes. This variation is recorded using the scale 8. Then, the valve 12 is opened and the valve 3 is closed, it results in the atmospheric pressure set again in the measurement system, and the water column returns to its original state. After that, the valve 12 is closed again and the valve 5 is opened, and due to the underpressure the water from the cylinders 11 transfers through the transparent pipe line 10 where the scale 8 shows the variations of the Δh_2 height of water column. These readings are recorded. Then, the valves 3, 4, 5, 12 and the relief valve are opened, and the measurement system returns to its original zero state.

The actions taken have the following theoretical interpretation. In view of the constant temperature of the system, its state in the cylinders 1, 6 at the P_{atm} atmospheric pressure and after the P_1 vacuum is created may be represented by the equations following the Boyle-Mariotte law:

$$P_1(V_c - V_b) = P_{atm}(V_c - V_b - \Delta V_1); \quad (1)$$

$$P_1 V_c = P_{atm}(V_c - \Delta V_2), \quad (2)$$

where P_{atm} is a numerical value of the atmospheric pressure, kPa; P_1 is a numerical value of the vacuum in the cylinders after air removal, kPa; V_c is the volume of each cylinder, cm³; V_b is the unknown volume of a body, cm³; $\Delta V_1, \Delta V_2$ is the air volume removed from the sample and the measuring cylinders, correspondingly, cm³.

Expressing P_1 from Eqs. (1) and (2) we can obtain respectively:

$$P_1 = \frac{P_{atm}(V_c - V_b - \Delta V_1)}{(V_c - V_b)}; \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{P_{atm}(V_c - \Delta V_2)}{V_c}. \quad (4)$$

Making equal the right-hand sides of the Eqs. (3) and (4) and solving for the V_b unknown body volume we obtain:

$$V_b = V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} \right).$$

In the overpressure mode the unit operates as follows. The sample 2 weighted on the weighing balance is placed into the sample cylinder 1 while the valves 3, 4, 5, 12 are opened and the cylinders 1 and 6 have the P_{atm} atmospheric pressure set. After that, the valve 4 is closed and the pneumatic pump 13 is turned on. The pneumatic pump 13 creates in the cylinders 1 and 6 the P_2 overpressure recorded by the manometer 14. When the desired value of overpressure is reached, the valve 12 is closed as well as the valves 3 and 5 further, and the pressure in the pneumatic pump 13 is equilibrated with the atmospheric pressure through the relief valve 15. After the valves 3 and 4 are successively opened, due to the overpressure the Δh_1 height of water column in the transparent pipe line 9 changes. This variation is recorded using the scale 7. Then, the valve 12 is opened and the valve 3 is closed, it results in the atmospheric pressure set again in the measurement system, and the water column returns to its original zero state. After that, the valve 12 is again closed and the valve 5 is opened, and due to the overpressure the water from the cylinders 11 transfers through the transparent pipe line 9 where the scale 7 shows the variations of the Δh_2 height of water column. These readings are recorded. Then, the valves 3, 4, 5, 12 and the relief valve are opened, and the measurement system returns to its original state.

The actions taken have the following theoretical interpretation. In view of the constant temperature of the system, its state in the vessels 1, 6 at the P_{atm} atmospheric pressure and after the P_2 overpressure is created may be represented by the equations following the Boyle-Mariotte law:

$$P_2(V_c - V_b) = P_{atm}(V_c - V_b + \Delta V_1); \quad (6)$$

$$P_2 V_c = P_{atm} (V_c + \Delta V_2), \quad (7)$$

where P_{atm} is the value of the atmospheric pressure, kPa; P_2 is the value of overpressure in the cylinders, kPa; $\Delta V_1, \Delta V_2$ is the air volume transferred from the atmosphere into the sample and the measuring cylinders, correspondingly, cm³.

Expressing P_{atm} from Eqs. (6) and (7) we obtain:

$$P_2 = \frac{P_{atm} (V_c - V_b + \Delta V_1)}{(V_c - V_b)}; \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{P_{atm} (V_c + \Delta V_2)}{V_c}. \quad (9)$$

Making equal the right-hand sides of the Eqs. (8) and (9) and solving for the V_b unknown body volume we obtain an equation for calculating the volume of a measured body:

$$V_b = V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} \right). \quad (10)$$

The density, in its turn, is defined by the following formula:

$$\rho = \frac{m}{V_c \left(1 - \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} \right)}. \quad (11)$$

Application of the Eqs. (5) or (10) requires certain explanations.

In the experimental study we can replace the $\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}$ ratio with the $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$ ratio, it can be explained by the following equation:

$$\Delta V = \frac{\pi d^2}{4} \Delta h, \quad (12)$$

where d is the diameter of the transparent pipe line, mm; Δh is the variation of the water column height, mm.

Significantly, at the same value of underpressure (overpressure) the volume of air removed from the cylinders (transferred from the atmosphere into the cylinders) depends on the volume of a measured sample, i.e. with an increase in the volume of a measured sample at $P_1 = \text{const}$ ($P_2 = \text{const}$) the volume of air actually removed from the cylinders (transferred from the atmosphere into the cylinders) decreases. Accordingly, a calibration test of the unit is required. Besides, to simplify further calculations it is better to eliminate the V_c value. Taking into account the Eqs. (12), (5) and (10), this may be represented as follows:

$$\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = 1 - \frac{V_b}{V_c}. \quad (13)$$

The presented methodology and the developed design can be used to determine the apparent volume and apparent density of not only the sapwood and heartwood parts of the stem wood, but also the bark, roots, branches, and rot.

For the experimental study aimed at measuring the volume and apparent density, we have used wood samples of aspen, spruce, birch, pine, and oak measuring

20×20×10 mm (the latter number shows the along-the-grain size) and taken from the sapwood of tree stems (Fig. 2).

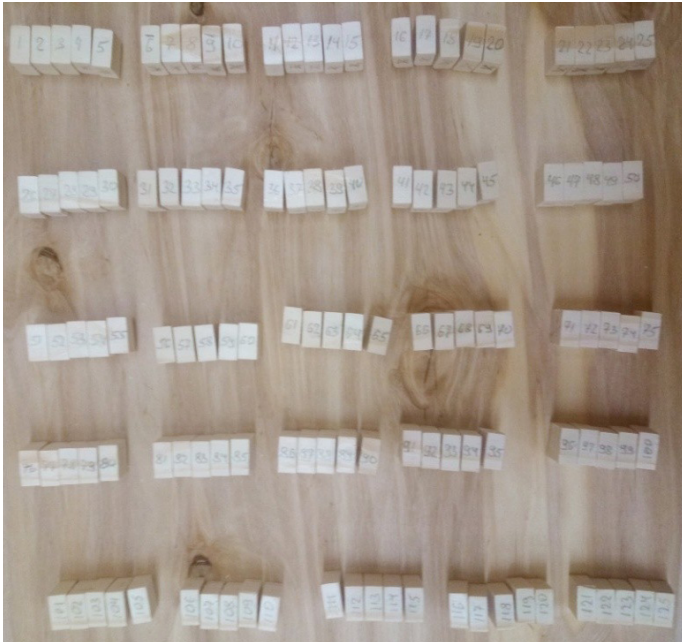


Fig. 2. The wood samples under consideration

125 samples have been selected for each species and taken in the direction from the butt end to the top. The samples have been divided into groups of 5 pieces. The moisture level has been maintained as absolutely dry. We have measured the weight of each sample using the Vibra electronic balance with an accuracy of 0.001 g. The apparent volume of each group has been defined after 10 measurements carried out in the laboratory unit.

Results and Discussion

For the calibration test of the laboratory unit, end blocks of various volumes have been used as a V_b reference body. The pressure values during the calibration test and experiments have been equal to -90 , -70 , $+70$ and $+90$ kPa. As a result, we have obtained the curves (Fig. 3) of the calibration test diagram where the $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$ ratio is on the x axis and the V_b volume corresponding to this ratio is on the y axis.

To ease further use, each curve of the calibration test diagram is described by the equation of the following type:

$$y = -kx + b, \quad (14)$$

where y is the volume of the V_b body, cm^3 ; k and b are the equation coefficients obtained from the calibration test results, and x is the $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$ ratio.

It is evident from the Eq. (14) that the first point of the calibration curves should have the $[1; 0]$ coordinates, i.e. when $V_b = 0$, and the ratio $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = 1$. Other points are determined by the coordinates depending on the volume of the reference

bodies and the $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$ ratios corresponding to them. Except the equations, the curves also represent the approximation validity coefficients. The value $R^2 = 1$ indicates an unambiguous correlation between the V_b and $\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$ values as well as the high confidence of the experiment results.

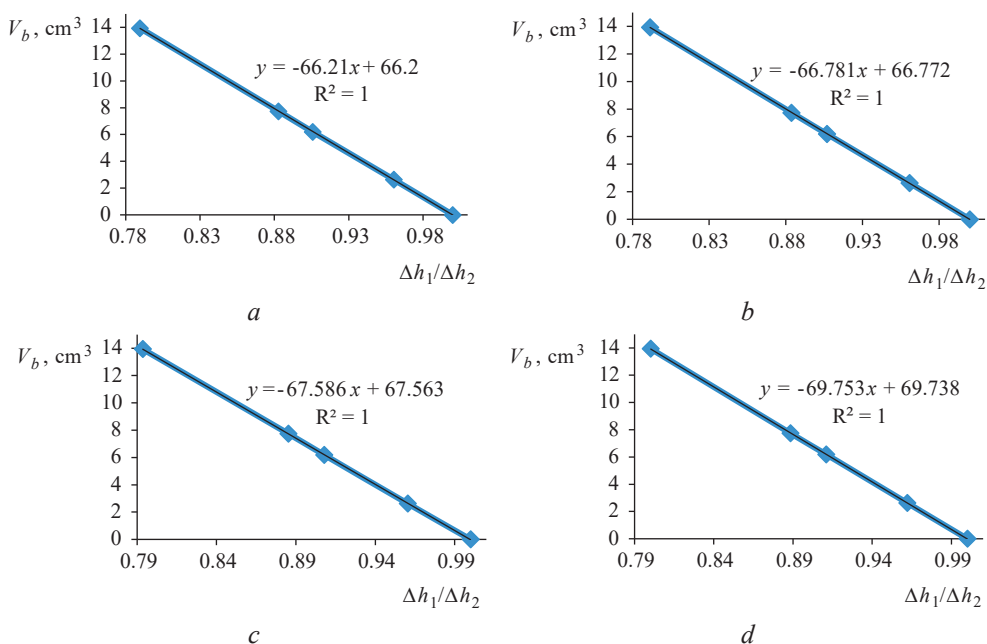


Fig. 3. The calibration curves at: *a* -90 kPa; *b* -70 kPa; *c* $+70$ kPa; *d* $+90$ kPa

The experimental data on the apparent density of the wood samples of various species which have been obtained in the conditions of different measurement modes are represented in fig. 4.

The obtained experimental data show that the apparent density values measured in the underpressure mode vary within the ranges of 1.361 to 1.434 g/cm^3 for aspen, 1.151 to 1.348 g/cm^3 for spruce, 1.356 to 1.402 g/cm^3 for birch, 1.298 to 1.444 g/cm^3 for pine, and 0.99 to 1.147 g/cm^3 for oak. The respective apparent density values measured in the overpressure mode are within 1.316 to 1.372 g/cm^3 for aspen, 1.106 to 1.274 g/cm^3 for spruce, 1.292 to 1.356 g/cm^3 for birch, 1.285 to 1.412 g/cm^3 for pine, and 0.904 to 1.138 g/cm^3 for oak. According to the available information [25] it is known that the cell-wall density determination by the pycnometry method applied for oak and other ring-porous and diffuse-porous species is difficult and gives unreliable results. The obtained experimental data on the oak apparent density have confirmed it.

The curves clearly show the difference between the results obtained in different operational modes of the measurement system. In all the cases, the density measured in the underpressure mode is greater than that measured in the overpressure mode and reaches the values up to 1.444 g/cm^3 . This value may confidently be considered true as it insignificantly differs from the value of cell-wall density 1.46 g/cm^3 measured by the helium pycnometry method.

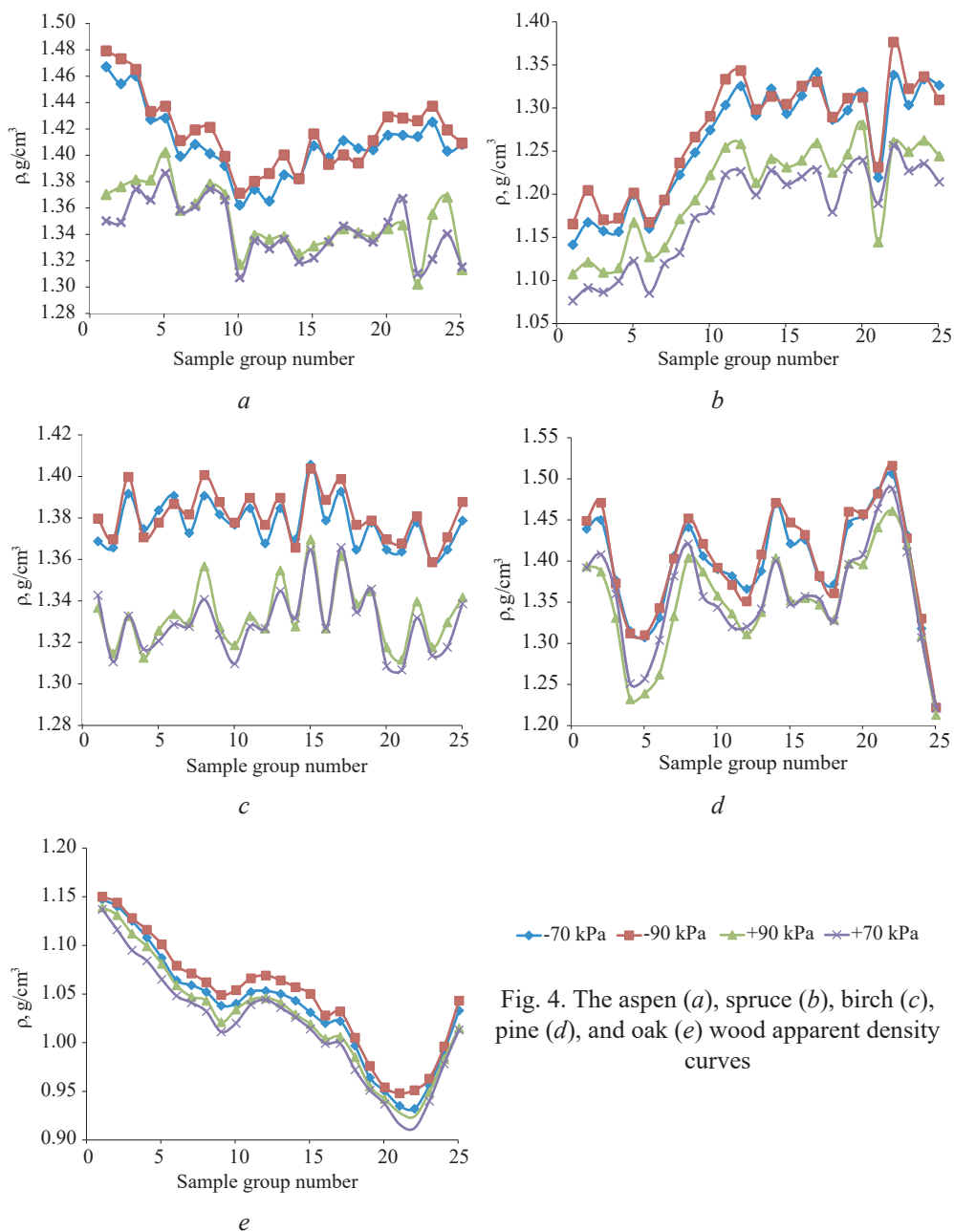


Fig. 4. The aspen (*a*), spruce (*b*), birch (*c*), pine (*d*), and oak (*e*) wood apparent density curves

Conclusions

The literature review has shown 4 main methods of measuring the cell-wall density of wood and porous materials: 3 of them are classified as direct methods (suspension, mercury porosimetry, and pycnometry) and 1 is indirect (optical (planimetric) method).

At the present time, the most common method is helium pycnometry. With regard to all the advantages and disadvantages of this method, the developments of new methods for determining the cell-wall density of wood and porous materials are carried on.

An alternative, authors' method for measuring the volume and determining the apparent density of wood and porous materials in the atmospheric air has been proposed. This method is theoretically justified and does not contradict the basic principles and laws of thermodynamics.

The efficiency of the proposed method and the high reliability of the obtained results have been proven experimentally.

With the use of the developed experimental unit, the volumes and apparent density values of various species of wood have been measured in different operational modes of the measurement system.

The lowest values of the apparent density have been obtained in the conditions of overpressure, and the highest ones – in the conditions of underpressure. It is related to the differences in the thermodynamical processes of air compression and rarefaction. The properties of thin air when compared with the compressed one are more similar to those of an ideal gas. Also, it is crucial how deeply air penetrates into the pores of samples during the compression and rarefaction processes. The result deviations between the highest and lowest values of the apparent density measured in different modes are, respectively, the following: for aspen – 6.83 %, for spruce – 8.54 %, for birch – 6.35 %, for pine – 6.82 %, and for oak – 3.91 %. The greatest deviation between the highest values of apparent density and the conventional value of 1.46 g/cm³ are respectively the following: for aspen – 1.78 %, for spruce – 7.67 %, for birch – 3.97 %, for pine – 1.1 %, and for oak – 21.44 %.

REFERENCES

1. Christensen G.N., Hergt H.F.A. The Apparent Density of Wood in Non-Swelling Liquids. *Holzforschung*, 1968, vol. 22, iss. 6, pp. 165–170. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1968.22.6.165>
2. Davidson G.F. The Specific Volume of Cotton Cellulose. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 1927, vol. 18, iss. 5, pp. 175–186. <https://doi.org/10.1080/19447022708661400>
3. Decoux V., Varcin E., Leban J.-M. Relationships between the Intra-Ring Wood Density Assessed by X-Ray Densitometry and Optical Anatomical Measurements in Conifers. Consequences for the Cell Wall Apparent Density Determination. *Annals of Forest Science*, 2004, vol. 61, no. 3, pp. 251–262. <https://doi.org/10.1051/forest:2004018>
4. DIN 66137. *Bestimmung der Dichte fester Stoffe – Teil 2: Gaspyknometrie*. Deutsche Norm, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, 2019. 15 p. (In Germ.). <https://dx.doi.org/10.31030/3031682>
5. Dunlap F. Density of Wood Substance and Porosity of Wood. *Journal of Agricultural Research*, 1914, vol. 2, iss. 6, pp. 423–428.
6. Gainullin Ren.H., Safina A.V., Gainullin Rish.H., Mukhametzyanov S.R. Determination of the True Density of Chaga by Gas Pycnometry in Atmospheric Air. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1889, art. no. 022044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022044>
7. Grzeczynski T., Rybarczyk W. Investigations on the Relation between Cell-Wall Density and Wood Density. *Prace Instytutu Technologii Drewna*, 1972, no. 19(1/2), pp. 165–183.
8. Hartig R. *Ueber die Vertheilung der Organischen Substanz, des Wassers und Luftraumes in den Bäumen, und Über die Ursache der Wasserbewegung in Transpirirenden Pflanzen*. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1882. 112 p. (In Germ.).
9. ISO 12154. *Determination of Density by Volumetric Displacement – Skeleton Density by Gas Pycnometry*, 2014. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12154:ed-1:vl:en> (accessed 14.03.25).

10. Jayme G., Krause T. Über die Packungsdichte der Zellwände in Laubhölzern. *Holz als Roh-und-Werkst*, 1963, vol. 21, pp. 14–19. (In Germ.).
<https://doi.org/10.1007/BF02605990>
11. Jiang Y., Lawrence M., Ansell M.P., Hussain A. Cell Wall Microstructure, Pore Size Distribution and Absolute Density of Hemp shiv. *Royal Society Open Science*, 2018, vol. 5, iss. 4, art. no. 171945. <https://doi.org/10.1098/rsos.171945>
12. Kollmann F.F.P., Côté W.A. *Principles of Wood Science and Technology*. Heidelberg, Springer Berlin, 1968. 592 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
13. Mcknight T.S., Marchessault R.H., Mason S.G. The Distribution of Pore Sizes in Wood-Pulp Fibres and Paper. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 1958, no. 59(2), pp. 81–88.
14. Panshin A.J., De Zeeuw C. *Textbook of Wood Technology*. McGraw-Hill Series in Forest Resources, 1970. 705 p.
15. Plötze M., Niemz P. Porosity and Pore Size Distribution of Different Wood Types as Determined by Mercury Intrusion Porosimetry. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2010, vol. 69, pp. 649–657. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0504-0>
16. Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p. (In Russ.).
17. Quirk J.T. Cell-Wall Density of Douglas Fir by Two Optometric Methods. *Wood and Fiber Science*, 1984, vol. 16, no. 2, pp. 224–236.
18. Raczkowski J., Stempień C. Zur Beziehung zwischen der Rohdichte und der Reindichte von Holz. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1967, vol. 25, pp. 380–383. (In Germ.).
<https://doi.org/10.1007/BF02615729>
19. Sachs J. Über die Porosität des Holzes. *Arbeiten des Botanischen Instituts in Würzburg*, Leipzig, Verlag von Wilhelm Engelmann, 1882, pp. 291–332. (In Germ.).
20. Stamm A.J. Density of Wood Substance, Adsorption by Wood, and Permeability of Wood. *The Journal of Physical Chemistry*, 1929, vol. 33, iss. 3, pp. 398–414.
<https://doi.org/10.1021/j150297a008>
21. Stayton C.L., Hart C.A. Determining Pore Size Distribution in Softwoods with a Mercury Porosimeter. *Forest Products Journal*, 1965, no. 15(10), pp. 435–440.
22. Tsoumis G., Passialis C. Effect of Growth Rate and Abnormal Growth on Wood Substance and Cell Wall Density. *Wood Science and Technology*, 1977, vol. 11, pp. 33–38.
<https://doi.org/10.1007/BF00353599>
23. Ugolev B.N. *Wood Science with the Basics of Forest Commodity Science*: 2nd ed., revised. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 368 p. (In Russ.).
24. Yiannos P.N. The Apparent Cell-Wall Density of Wood and Pulp Fibers. *TAPPI*, 1964, vol. 47, no. 8, pp. 468–471.
25. Zauer M., Pfriem A., Wagenführ A. Toward Improved Understanding of the Cell-Wall Density and Porosity of Wood Determined by Gas Pycnometry. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, pp. 1197–1211. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0568-1>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 674.093:047

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-131-141

Синхронизация технологий раскря бревен и сушки пиломатериалов

В.В. Огурцов, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [AAZ-7418-2020](https://orcid.org/0000-0002-8995-0496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8995-0496>

Е.В. Каргина, канд. техн. наук; *ResearcherID:* [AAZ-7109-2020](https://orcid.org/0000-0003-0158-8259),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-8259>

А.А. Орлов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [KBA-4858-2024](https://orcid.org/0000-0002-9370-7544),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9370-7544>

Д.В. Дук[✉], аспирант; *ResearcherID:* [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; vogurtsov@mail.ru, ev_kargina@mail.ru, Orlov.tepl@mail.ru, danil.duk@yandex.ru[✉]

Поступила в редакцию 06.06.25 / Одобрена после рецензирования 13.09.25 / Принята к печати 15.09.25

Аннотация. Исследование посвящено синхронизации процессов раскря бревен и сушки пиломатериалов. Показано, что при реальном количестве сечений пиломатериалов, вырабатываемых крупно-поточным лесопильным производством за технологический период, буферные накопители сушильных штабелей досок не обеспечивают бесперебойную работу туннелей. Наблюдается либо переполнение буферных накопителей штабелями, либо их отсутствие в моменты возникновения свободных мест в туннелях. Используемые методы расчета буферных накопителей штабелей не учитывают вероятностную природу характеристик лесопильного и сушильного цехов. В них нет математического описания взаимосвязей между интенсивностью поступления штабелей сырых пиломатериалов, вместимостью буферного накопителя, а также количеством и вместимостью сушильных туннелей. Цель настоящей работы – найти закономерности накопления штабелей пиломатериалов перед сушильными туннелями и загрузки туннелей штабелями с установлением среднего времени ожидания штабелей в накопителе при различных характеристиках процессов распиловки бревен и сушки пиломатериалов. Система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с параллельным функционированием каналов и ожиданием. Основными исходными показателями системы являются интенсивность поступления штабелей пиломатериалов в накопитель перед сушильными туннелями и интенсивность сушки пиломатериалов в 1 туннеле. В качестве основных выходных операционных характеристик выступают вероятность полной загрузки туннелей, среднее количество штабелей в накопителе и время нахождения штабеля в накопителе. Установлены общие закономерности процессов накопления штабелей досок и заполнения сушильных туннелей в условиях крупно-поточного производства пиломатериалов. Представлены примеры решения практических задач синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов. Показано, что полученные графики и математические модели позволяют решать производственные задачи: анализировать влияние породы и размеров распиливаемого сырья, структуры поставок, скоростей подачи бревнопиль-

ного оборудования, режимов работы лесопильного цеха, а также режимов сушки пиломатериалов на выбор количества туннелей и их вместимости.

Ключевые слова: распиловка, пиломатериал, накопитель, сушильный туннель, синхронизация, сушка

Для цитирования: Огурцов В.В., Каргина Е.В., Орлов А.А., Дук Д.В. Синхронизация технологий раскря бревен и сушки пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 131–141. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-131-141>

Original article

Synchronization of Log Cutting and Sawn Timber Drying Technologies

Victor V. Ogurtsov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAZ-7418-2020](https://orcid.org/0000-0002-8995-0496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8995-0496>

Elena V. Kargina, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAZ-7109-2020](https://orcid.org/0000-0003-0158-8259),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-8259>

Aleksandr A. Orlov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [KBA-4858-2024](https://orcid.org/0000-0002-9370-7544),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9370-7544>

Daniil V. Duk[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vogurtsov@mail.ru, ev_kargina@mail.ru, Orlov.tepl@mail.ru, danil.duk@yandex.ru[✉]

Received on June 6, 2025 / Approved after reviewing on September 13, 2025 / Accepted on September 15, 2025

Abstract. The research is devoted to the synchronization of log cutting and sawn timber drying processes. It has been shown that, given the actual number of sawn timber sections produced by large-scale sawmilling during the technological period, the buffer storage units of drying stacks of boards do not ensure the uninterrupted operation of the tunnels. There is either an overflow of buffer storage units with stacks, or their absence when free space occurs in the tunnels. The methods used for calculating the buffer storage units of the stacks do not take into account the probabilistic nature of the characteristics of sawmills and drying shops. They do not provide a mathematical description of the relationships between the rate of incoming raw sawn timber stacks, the capacity of the buffer storage unit, as well as the number and capacity of drying tunnels. The aim of this work has been to find the patterns of accumulation of sawn timber stacks in front of drying tunnels and loading tunnels with stacks, with the establishment of the average waiting time for stacks in the storage unit under different characteristics of log sawing and sawn timber drying processes. The “stack storage unit – drying tunnels” system has been presented as a multi-channel queuing system with parallel operation of channels and waiting. The main initial indicators of the system are the rate of incoming raw sawn timber stacks to the storage unit in front of the drying tunnels and the intensity of sawn timber drying in 1 tunnel. The main output operational characteristics are the probability of a full tunnel load, the average number of stacks in the storage unit, and the time the stack remains in the storage unit. The general patterns of accumulation of board stacks and filling of drying tunnels in the conditions of large-scale production of sawn timber have been established. The examples of solving practical

problems of synchronizing sawmilling and sawn timber drying have been presented. It has been shown that the obtained graphs and mathematical models make it possible to solve production problems: to analyze the influence of the type and size of the sawn raw material, the structure of the sawing patterns, the feed rates of the sawmill equipment, the operating modes of the sawmill, as well as the drying modes of the sawn timber on the choice of the number of tunnels and their capacity.

Keywords: sawing, sawn timber, storage unit, drying tunnel, synchronization, drying

For citation: Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Orlov A.A., Duk D.V. Synchronization of Log Cutting and Sawn Timber Drying Technologies. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 131–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-131-141>

Введение

Производственный процесс крупно-поточного лесопильного предприятия представляет собой цепь высокопроизводительных линий, соединенных межлинейными буферными накопителями [4–7, 10, 16–25]. Последние обеспечивают формирование партий запуска линий при смене размерных характеристик обрабатываемых материалов и синхронизацию линий в условиях их стационарного стохастического функционирования. Опыт эксплуатации крупно-поточных лесопильных предприятий позволил сформулировать параметрические условия их гармоничной работы [4–7, 16]. Одно из основных условий состоит в том, что в течение технологического периода следует вырабатывать не более 8 сечений пиломатериалов. В настоящее время на крупнопоточных предприятиях это требование почти не выполняется из-за большого количества мелких заказов со специфическими сечениями пиломатериалов, которые не поддаются группированию и унификации [7]. В результате на стыке лесопильных и сушильных цехов возникают нештатные ситуации с переполнением накопителей или нехваткой штабелей для загрузки сушильных туннелей. Встают вопросы вместимости буферного накопителя штабелей, а также количества и емкости сушильных туннелей для обеспечения их оптимального функционирования при реально существующем количестве сечений пиломатериалов и закономерностях их поступления из лесопильного цеха [11].

Цель работы – найти закономерности накопления штабелей пиломатериалов перед сушильными туннелями и загрузки туннелей штабелями с установлением среднего времени ожидания штабелей в накопителе при различных характеристиках процессов распиловки бревен и сушки пиломатериалов.

Объекты и методы исследования

В работе авторов [12] система «накопитель штабелей – сушильные туннели» представлена как мультиканальная система массового обслуживания с параллельным функционированием с каналов и ожиданием [1–3, 8, 9, 13–15].

Основными исходными операционными характеристиками системы являются: интенсивность λ поступления штабелей пиломатериалов в накопитель перед сушильными туннелями; интенсивность μ сушки пиломатериалов в

1 туннеле; коэффициент загруженности ρ 1-й позиции туннеля (трафик, интенсивность) и количество туннелей c .

В рассматриваемой задаче λ представляет собой производительность лесопильного производств за 1 сут., выраженную в количестве сушимых штабелей:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{сут}}^{\text{пм}} \Delta_{\text{тол}}^j}{K_{\text{тол}}^j H_{\text{шт}} B_{\text{шт}} L_{\text{шт}} K_{\text{шт}}^j}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сут}}^{\text{пм}}$ – объем пиломатериалов, м³/сут.; $\Delta_{\text{тол}}^j$ – доля пиломатериалов j -й группы толщин, $j = 1$ для тонких или $j = 2$ для толстых; $K_{\text{тол}}^j$ – количество толщин j -й группы толщин; $H_{\text{шт}}$, $B_{\text{шт}}$, $L_{\text{шт}}$ – высота, ширина и длина соответственно сушеного штабеля, м; $K_{\text{шт}}^j$ – коэффициент объемного заполнения штабеля пиломатериалами j -й толщины.

Интенсивность μ определяет производительность 1 сушильного туннеля за 1 сут., также выраженную в штабелях:

$$\mu = \frac{24E_{\text{т}}}{\tau_{\text{суш}}^j}, \quad (2)$$

где $E_{\text{т}}$ – емкость туннеля, количество штабелей; $\tau_{\text{суш}}^j$ – продолжительность сушки пиломатериалов j -й толщины, ч.

Тогда

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

является безразмерным отношением производительностей процессов раскря бревен и сушки пиломатериалов при условии функционирования 1 туннеля и без привязки к продолжительности технологического периода, как это предусмотрено в теории массового обслуживания [1, 14, 15].

Основными выходными операционными характеристиками при стационарной фазе процесса является вероятность $P_{\text{пз}}$ полной загрузки туннелей, среднее количество штабелей L_q в накопителе и среднее время W_q нахождения штабеля в накопителе [1, 12, 14, 15]:

$$P_{\text{пз}} = \frac{\rho^c}{c! \left(1 - \frac{\rho}{c}\right)} \left(\sum_{j=0}^{c-1} \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^c}{c! \left(1 - \frac{\rho}{c}\right)} \right)^{-1}, \quad (3)$$

$$L_q = P_{\text{пз}} \frac{\rho}{c - \rho}, \quad (4)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}.$$

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены зависимости вероятности полной загрузки туннелей от их количества.

Таблица 1

Вероятность полной загрузки туннелей, %, в зависимости от их количества
The probability of tunnels being fully loaded, %, depending on their number

ρ	Количество туннелей						
	2	3	4	5	6	7	8
1,0	33,33	9,09	2,04	—	—	—	—
1,2	44,99	14,11	3,70	—	—	—	—
1,4	57,64	20,33	6,03	1,53	—	—	—
1,6	71,11	27,37	9,06	2,58	—	—	—
1,8	85,26	35,47	12,85	4,04	1,11	—	—
2,0	100,00*	44,44	17,39	5,97	1,80	—	—
2,2	—	54,21	21,67	8,39	2,74	—	—
2,4	—	64,71	28,70	11,35	3,99	1,25	—
2,6	—	75,88	35,44	14,86	5,58	1,87	—
2,8	—	87,66	42,86	18,95	7,54	2,70	—
3,0	—	100,00*	50,94	23,61	9,91	3,76	1,29
3,2	—	—	59,64	28,85	12,71	5,08	1,84
3,4	—	—	68,93	34,66	15,95	6,69	2,56
3,6	—	—	78,77	41,03	19,65	8,62	3,46
3,8	—	—	89,14	47,95	23,82	10,68	4,56
4,0	—	—	100,00*	55,41	28,47	13,51	5,90
4,2	—	—	—	63,37	33,59	16,50	7,49
4,4	—	—	—	71,83	39,19	19,68	9,35
4,6	—	—	—	80,77	45,25	23,65	11,50
4,8	—	—	—	90,16	51,77	27,83	13,95
5,0	—	—	—	100,00*	58,75	32,41	16,72
5,2	—	—	—	—	66,16	37,40	19,82
5,4	—	—	—	—	74,01	42,79	23,37
5,6	—	—	—	—	82,27	48,59	27,06
5,8	—	—	—	—	90,94	54,79	31,20
6,0	—	—	—	—	100,00*	61,38	35,69

*Значения получены экстраполированием.

Математические модели полной загрузки туннелей имеют вид:

$$\begin{aligned}
 P_{пз}^2 &= 9,55\rho^2 + 38,14\rho - 14,44; \\
 P_{пз}^3 &= 10,10\rho^2 + 5,44\rho - 6,86; \\
 P_{пз}^4 &= 8,56\rho^2 - 9,83\rho + 2,98; \\
 P_{пз}^5 &= 6,79\rho^2 - 16,02\rho + 10,75; \\
 P_{пз}^6 &= 5,57\rho^2 - 20,07\rho + 19,75; \\
 P_{пз}^7 &= 4,55\rho^2 - 21,86\rho + 28,04; \\
 P_{пз}^8 &= 3,53\rho^2 - 20,55\rho + 31,52.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Из рис. 1 видно, что вероятность полной загрузки туннелей существенно зависит от отношения производительностей лесопильного цеха и туннеля, а также от количества туннелей. Степень влияния ρ на $P_{пз}^c$ явно ослабевает при увеличении количества туннелей от 2 до 8. Все зависимости $P_{пз}^c$ от ρ описыва-

ются полиномами 2-й степени с достаточно высокими коэффициентами детерминации – от 0,9997 до 1 (5).

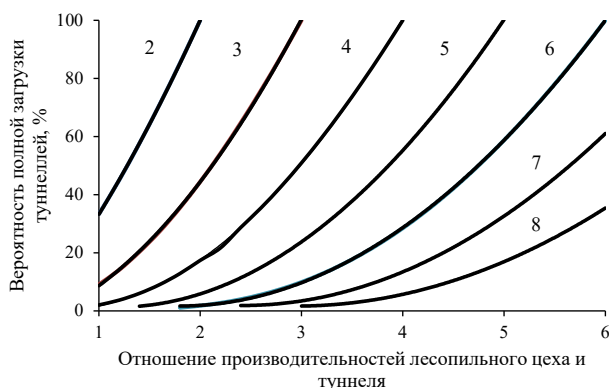


Рис. 1. Зависимость вероятности полной загрузки туннелей от отношения производительностей лесопильного цеха и туннеля (2...8 – количество туннелей)

Fig. 1. The dependence of the probability of full loading of tunnels on the ratio of sawmill and tunnel productivity (2...8 – number of tunnels)

Семейство графиков, представленных на рис. 1, показывает, что 100%-я загрузка туннелей при любом их количестве достигается в случае $c = \rho$. Однако из формул (1), (2) видно, что равенство $c = \rho$ математически недопустимо. Поэтому в расчетах использовались близкие к недопустимым значения ρ . Например, при $c = 3$ вместо $\rho = 3$ принимали $\rho = 2,9$.

Представленные на рис. 1 графики и математические модели (3) позволяют находить вероятности полной загрузки туннелей при известном соотношении производительностей лесопильного цеха и туннеля для данной породы и группы толщин досок.

Если, например, соотношение производительностей на предприятии $\rho = 4,55$ и оно располагает 5 туннелями, то вероятность их полной загрузки составляет 80 %. Следовательно, 20 % продолжительности суток (около 5 ч) хотя бы 1 туннель окажется недозагружен, а в накопитель не поступит соответствующих штабелей.

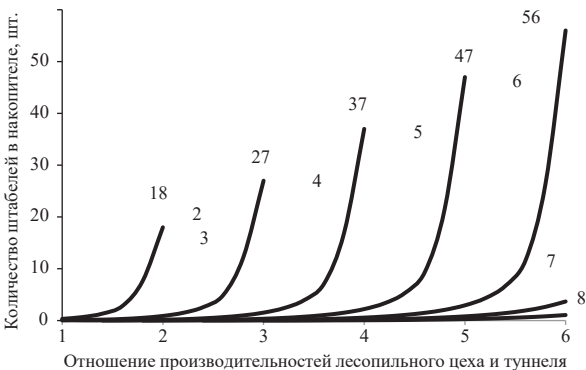
Если, например, 30 % пиломатериалов данной породы и группы толщин могут быть высушены в существующих камерах периодического действия, то для 70 % пиломатериалов закупаются туннели. Соотношение производительностей лесопильного цеха и туннеля составляет $\rho = 3,5$. Тогда, откладывая по осям координат 3,5 и 70, попадаем на кривую 4. Следовательно, необходимо установить на предприятии 4 сушильных туннеля.

Из рассмотренных примеров видно, что полученные графики и математические модели позволяют решать производственные задачи: анализировать влияние породы и размеров распиливаемого сырья, структуры поставок, скоростей подачи бревнопильного оборудования, режимов работы лесопильного цеха, а также режимов сушки пиломатериалов на выбор количества туннелей и их вместимости.

Представленные на рис. 2 графики и математические модели (6), а также данные табл. 2 описывают закономерности процесса накопления штабелей досок перед их загрузкой в туннели в зависимости от соотношения ρ производительностей процессов раскря бревен и сушки пиломатериалов, а также от количества используемых сушильных туннелей. Они позволяют решать практические задачи синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов.

Рис. 2. Зависимость количества штабелей в накопителе от отношения производительностей лесопильного цеха и туннеля (2...8 – количество туннелей)

Fig. 2. The dependence of the number of stacks in the storage unit on the ratio of the sawmill and tunnel productivity (2...8 – number of tunnels)



$$\begin{aligned} L_q^2 &= 38,6\rho^3 - 143,97\rho^2 + 179,4\rho - 73,77; \\ L_q^3 &= 12,31\rho^4 - 84,73\rho^3 + 213,23\rho^2 - 230,59\rho + 90,13; \\ L_q^4 &= 3,37\rho^5 - 37,23\rho^4 + 158,42\rho^3 - 322,55\rho^2 + 312,7\rho - 115,03; \\ L_q^5 &= 2,12\rho^5 - 30,64\rho^4 + 171,33\rho^3 - 461,24\rho^2 + 595,81\rho - 294,75; \\ L_q^6 &= 1,31\rho^5 - 23,28\rho^4 + 160,86\rho^3 - 537,22\rho^2 + 864,64\rho - 535,6; \\ L_q^7 &= 0,47\rho^2 - 3,19\rho + 5,26; \\ L_q^8 &= 0,18\rho^2 - 1,30\rho + 2,36. \end{aligned} \tag{6}$$

Таблица 2

Среднее количество штабелей в накопителе в зависимости от числа туннелей
The average number of stacks in the storage unit depending on the number of tunnels

ρ	Количество штабелей при числе туннелей						
	2	3	4	5	6	7	8
1,0	0,33	0,05	0,07	—	—	—	—
1,2	0,67	0,16	0,03	—	—	—	—
1,4	1,34	0,18	0,03	0,01	—	—	—
1,6	2,84	0,31	0,06	0,01	—	—	—
1,8	7,67	0,53	0,11	0,02	0	—	—
2,0	18,00	0,89	0,17	0,04	0,01	—	—
2,2	—	1,49	0,26	0,07	0,02	—	—
2,4	—	2,59	0,43	0,10	0,03	0,01	—
2,6	—	4,93	0,66	0,16	0,04	0,01	—
2,8	—	12,27	1,00	0,24	0,07	0,02	—
3,0	—	27,00*	1,53	0,35	0,10	0,03	0,01
3,2	—	—	2,39	0,51	0,15	0,04	0,01
3,4	—	—	3,91	0,74	0,21	0,06	0,02
3,6	—	—	7,09	1,06	0,29	0,09	0,03
3,8	—	—	16,94	1,52	0,41	0,13	0,04
4,0	—	—	37,00*	2,22	0,57	0,18	0,06
4,2	—	—	—	3,33	0,78	0,25	0,08
4,4	—	—	—	5,27	1,08	0,33	0,11
4,6	—	—	—	9,29	1,49	0,45	0,16
4,8	—	—	—	21,64	2,07	0,61	0,21
5,0	—	—	—	47,00*	2,94	0,81	0,28

Окончание табл. 2

ρ	Количество штабелей при числе туннелей						
	2	3	4	5	6	7	8
5,2	—	—	—	—	4,30	1,08	0,37
5,4	—	—	—	—	6,66	1,44	0,49
5,6	—	—	—	—	11,52	1,94	0,63
5,8	—	—	—	—	26,37	2,65	0,82
6,0	—	—	—	—	56,00*	3,68	1,07

*Значения определены при $\rho = 0,1$ ($\rho = 1,9; 2,9 \dots$).

Если, например, на предприятии установлено 5 туннелей для сушки досок заданной породы и толщины и перед туннелями для них предусмотрено в накопителе 15 штабелемест, то, используя график 5, определяем предельное отношение производительностей лесопильного и сушильного процессов: $\rho = 4,7$. То есть производительность процесса изготовления данных пиломатериалов не должна превышать производительность 1 туннеля более чем в 4,7 раза. При невыполнении этого требования количество штабелей, ожидающих загрузку в туннели, будет неограниченно возрастать до нереальных объемов. Если, например, $\rho = 4,99$, то в накопителе в среднем будет 517 штабелей. На графике рис. 2 отражено количество штабелей в накопителе при $\rho = c - 0,1$.

Если предприятие в связи с ограниченностью площадей не имеет возможности организовать перед туннелями накопитель вместимостью более чем, например, 10 штабелей, а производительность лесопильного цеха в 3,5 раза превышает производительность 1 туннеля, то для определения требуемого количества туннелей по оси ординат откладываем 10 штабелей, а по оси абсцисс — $\rho = 3,5$. Точка пересечения лежит рядом с графиком 4. Следовательно, для выполнения заданных условий необходимо 4 туннеля. После этого уточняем полученный результат. По оси абсцисс откладываем $\rho = 3,5$ и поднимаемся до кривой 4. Точке пересечения соответствует по оси ординат 5 штабелей в накопителе. Таким образом, при использовании 4 туннелей с соотношением производительностей лесопильного цеха и туннеля 3,5 в накопителе в среднем будет находиться 5 штабелей.

Следует отметить, что при использовании 4 туннелей соотношение производительностей лесопильного цеха и 4 туннелей сушильного цеха составляет 0,875 (3,5:4). То есть при 4 туннелях выполняется фундаментальное правило последовательного сочленения линий, состоящее в обязательном нарастании производительностей. В данном примере производительность 4 сушильных туннелей на 12,5 % выше, чем производительность лесопильного цеха, однако из-за случайных процессов туннели не справляются с потоком штабелей и в накопителе создается «очередь» в среднем из 5 штабелей. Следует отметить, что такая очередь является недостаточной для нормального функционирования туннелей с вероятностью их полной загрузки 95 %. Из рис. 1 и математической модели (1) видно, что при $\rho = 3,5$ и $c = 4$ вероятность полной загрузки равна 73,4 %. Для достижения загрузки 95 % обратными действиями находим $\rho = 3,9$. Затем по формуле (4) и рис. 2 находим количество штабелей в накопителе $L_q = 37$. Для сдерживания дальнейшего роста количества штабелей в накопителе необходимы сушильные камеры периодического действия.

Проведенный анализ показывает, что при повышении вероятности полной загрузки туннелей до 95 % путем установления соотношения производительностей лесопиления и сушки досок на уровне $c = 0,1$ в накопителе формируется очередь в среднем от 18 до 75 штабелей.

Найденные закономерности формирования «очереди штабелей» перед их загрузкой в сушильные туннели позволяют оценивать возможность реализации вариантов синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов.

Таким образом, система «накопитель штабелей – сушильные туннели» чувствительна к соотношению производительностей в области $P_{пз}^c = 95\%$. Небольшое отклонение p в сторону положительных значений от расчетного показателя приводит к лавинообразному накоплению штабелей в накопителе. Для локализации этих процессов сушильные туннели должны работать в сочетании с камерами периодического действия.

Выводы

1. Установлены общие закономерности процессов накопления штабелей досок и заполнения сушильных туннелей в условиях крупнопоточного производства пиломатериалов.

2. Получены графики и математические модели, позволяющие прогнозировать количество штабелей в накопителе и находить вероятность полной загрузки туннелей при известном соотношении производительностей лесопильного цеха и туннеля для данной породы и группы толщин досок.

3. Представлены примеры решения практических задач синхронизации лесопиления и сушки пиломатериалов.

4. Показано, что полученные графики и математические модели дают возможность оценивать влияние породы и размеров распиливаемого сырья, структуры поставов, скоростей подачи бревнопильного оборудования, режимов работы лесопильного цеха, а также режимов сушки пиломатериалов на количество туннелей и их вместимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вагнер Г. Основы исследования операций. М.: Мир, 1973. Т. 3. 501 с.
Wagner G. *Fundamentals of Operations Research*. Moscow, Mir Publ. House, 1973, vol. 3. 501 p. (In Russ.).
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
Ventzel E.S., Ovcharov L.A. *Probability Theory and its Engineering Applications*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 480 p. (In Russ.).
3. Зорин А.В., Зорин В.А., Пройдакова Е.В., Федоткин М.А. Введение в общие цепи Маркова. Н. Новгород: Нижегородск. гос. ун-т, 2013. 51 с.
Zorin A.V., Zorin V.A., Projdakova E.V., Fedotkin M.A. *Introduction to General Markov Chains*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University Publ., 2013. 51 p. (In Russ.).
4. Калишеевский Р.Е. Технология лесопиления. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 264 с.
Kaliteevskij R.E. *Sawmilling Technology*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 264 p. (In Russ.).
5. Калишеевский Р.Е. Лесопиление в XXI веке. Технология, оборудование, менеджмент. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: ПрофиКС, 2008. 499 с.

Kaliteevskij R.E. *Sawmilling in the XXI Century. Technology, Equipment, and Management*: 2nd ed., revised and enlarged. St. Petersburg, ProfiKS Publ., 2008. 499 p. (In Russ.).

6. Калитеевский Р.Е., Артеменков А.М., Тамби А.А. Информационные технологии в лесопилении. СПб.: Профи, 2010. 191 с.

Kaliteevskij R.E., Artemenkov A.M., Tambi A.A. *Information Technologies in Sawmilling*. St. Petersburg, Profi Publ., 2010. 191 p. (In Russ.).

7. Каргина Е.В. Повышение эффективности массового крупно-поточного лесопиления путем управления дробностью сортировки бревен по толщине: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2024. 200 с.

Kargina E.V. *Improving the Efficiency of Large-Scale Mass Sawmilling by Controlling the Granularity of Log Sorting by Thickness*: Cand. Tech. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2024. 200 p. (In Russ.).

8. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с. Klejnrok L. *Queueing Theory*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 432 p. (In Russ.).

9. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. М.: ИПУ РАН, 2003. 102 с.

Novikov D.A. *Network Structures and Organizational Systems*. Moscow, Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2003. 102 p. (In Russ.).

10. Огурцов В.В. Теория брусо-развальной распиловки бревен: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2013. 233 с.

Ogurtsov V.V. *Theory of the Cant Sawing of the Logs*: Monograph. Krasnoyarsk, Siberian State Technical University Publ., 2013. 233 p. (In Russ.).

11. Огурцов В.В., Каргина Е.В., Матвеева И.С. Двухкритериальная математическая модель оптимизации дробности сортировки бревен по толщине // Хвойные бореал. зоны. 2024. Т. XLII, № 4. С. 89–94.

Ogurtsov V.V., Kargina E.V., Matveeva I.S. A Two-Criterion Mathematical Model for Optimizing the Fractional Sorting of Logs by Thickness. *Khvojnye borealnoj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2024, vol. XLII, no. 4, pp. 89–94. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-4-89-94>

12. Огурцов В.В., Орлов А.А., Дук Д.В. Идентификация проблемы синхронизации процессов раскряга бревен и сушки пиломатериалов // Хвойные бореал. зоны. 2025. Т. XLIII, № 2. С. 70–76.

Ogurtsov V.V., Orlov A.A., Duk D.V. Identification of the Problem of Synchronization of Log Cutting and Sawed Timber Drying Processes. *Khvojnye borealnoj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2025, vol. XLIII, no. 2, pp. 70–76. (In Russ.).

<https://doi.org/10.53374/1993-0135-2025-2-70-76>

13. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1968. 352 с.

Ore O. *Graph Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 352 p. (In Russ.).

14. Таха Х. Введение в исследование операций. Т. 2. М.: Мир, 1985. 496 с.

Takha Kh. *Introduction to Operations Research*. Moscow, Mir Publ. House, 1985, vol. 2. 496 p. (In Russ.).

15. Трухан А.А., Кудряшев Г.С. Теория вероятностей в инженерных приложениях. Иркутск: Форвард, 2009. 364 с.

Trukhan A.A., Kudryashev G.S. *Probability Theory in Engineering Applications*. Irkutsk, Forward Publ., 2009. 364 p. (In Russ.).

16. Турушев В.Г. Технологические основы автоматизированного производства пиломатериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 208 с.

Turushev V.G. *Technological Foundations of Automated Lumber Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 208 p. (In Russ.).

17. Chang S.J., Gazo R. Measuring the Effect of Internal Log Defect Scanning on the Value of Lumber Produced. *Forest Products Journal*, 2009, vol. 59, iss. 11–12, pp. 56–59. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-59.11.56>

18. Hébert F., Grondin F., Plaice J. Mathematical Modeling of Curve Sawing Techniques for Lumber Industry. *Applied Mathematical Modelling*, 2000, vol. 24, iss. 8–9, pp. 677–687. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(00\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(00)00009-3)
19. Hinostroza I., Pradenas L., Parada V. Board Cutting from Logs: Optimal and Heuristic Approaches for the Problem of Packing Rectangles in a Circle. *International Journal of Production Economics*, 2013, vol. 145, iss. 2, pp. 541–546. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.047>
20. Ikami Y., Matsumura Y., Murata K., Tsuchikawa S. Effect of Crosscutting Crooked Sugi (*Cryptomeria japonica*) Logs on Sawing Yield and Quality of Sawn Lumber. *Forest Products Journal*, 2010, vol. 60, iss. 3, pp. 244–248. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-60.3.244>
21. Johansson J. Mechanical Processing for Improved Products Made from Swedish Hardwood. *Acta Wexionensia*, 2008, no. 157. 46 p.
22. Lin W., Wang J., Wu J., DeVallance D. Log Sawing Practices and Lumber Recovery of Small Hardwood Sawmills in West Virginia. *Forest Products Journal*, 2011, vol. 61, iss. 3, pp. 216–224. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.3.216>
23. Makkonen M. *Renewing the Sawmill Industry: Studies on Innovation, Customer Value and Digitalization*: Academic Dissertation. Finland, Helsinki, University of Helsinki, Dissertationes Forestales 269, 2019. 65 p. <https://doi.org/10.14214/df.269>
24. Montero R.S., Moya R. Reducing Warp and Checking in 4 by 4 Beams from Small-Diameter Tropical Species (*Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, and *Cordia alliodora*) Obtained by Turning the Pith Inside Out. *Forest Products Journal*, 2015, vol. 65, iss. 5–6, pp. 285–291. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00089>
25. Murara Junior M.I., Pereiro da Rocha M., Trugilho P.F. Estimativa do Rendimento em Madeira Serrada de Pinus para Duas Metodologias de Desdobro. *Floresta e Ambiente*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 556–563. (In Port.). <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2013.037>

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 676.017.7

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-142-154

Сравнительный анализ тароупаковочного картона, полученного из различных видов целлюлозного волокнистого сырья

И.С. Содиков[✉], аспирант; ResearcherID: [HKV-1291-2023](https://orcid.org/0000-0002-2537-360X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2537-360X>

Н.В. Щербак, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; sodikovismoil@gmail.com[✉], n.sisoeva@narfu.ru

Поступила в редакцию 11.02.25 / Одобрена после рецензирования 23.04.25 / Принята к печати 27.04.25

Аннотация. Представлен сравнительный анализ свойств тароупаковочных видов картона, изготовленного в лабораторных условиях из целлюлозы стеблей хлопчатника, с промышленными образцами картона из вторичного сырья и полуфабрикатов высокого выхода, производимых на целлюлозных заводах России. Целью исследования является оценка возможности использования отходов хлопка как дополнительного или альтернативного сырья для получения тароупаковочных картонов, особенно в странах-производителях хлопка. Применение стеблей хлопка в качестве сырья для изготовления бумаги и картона не только решает проблемы сельскохозяйственных отходов, но и дает возможность внедрения модели циклической экономики, в соответствии с которой отходы повторно перерабатываются с получением материалов с высокой маржинальностью. Сравнивали образцы картона из целлюлозы стеблей хлопчатника 3 видов от разных производителей: картон-лайнер из первичного волокна Архангельского целлюлозно-бумажного комбината; из макулатуры марки МС-5Б Каменской бумажно-картонной фабрики и предприятия «Маяк»; картон-лайнер из эвкалиптовой макулатуры одного из предприятий Бразилии. Для оценки структурных характеристик образцов проведен микроскопический анализ волокна, позволивший визуализировать отличия морфологического строения волокон разной природы. Установлено, что целлюлоза стеблей хлопчатника по геометрическим параметрам ближе к показателям эвкалиптового макулатурного волокна. Длина волокна составила 0,75 мм, что на 40 % ниже, чем у образцов картона Каменской бумажно-картонной фабрики и «Маяка», и более чем в 2 раза меньше по сравнению со средней длиной целлюлозы в композиции картона Архангельского целлюлозно-бумажного комбината. Подготовку проб к испытаниям проводили по стандартным методикам в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57207–2008. Выполнен анализ физико-механических характеристик материалов, таких как разрывная длина, сопротивление продавливанию и др. Ввиду экологической и экономической целесообразности переработки недревесного сырья техноло-

гия производства картона из стеблей хлопчатника представляет собой важный шаг к созданию более устойчивых и конкурентоспособных материалов.

Ключевые слова: картон из стеблей хлопчатника, картон-лайнер, первичное волокно, макулатурное волокно, недревесное сырье, древесное сырье

Благодарности: Сравнительный анализ тароупаковочных видов бумаг проводили с использованием оборудования ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск.

Для цитирования: Содиков И.С., Щербак Н.В. Сравнительный анализ тароупаковочного картона, полученного из различных видов целлюлозного волокнистого сырья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 142–154. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-142-154>

Original article

Comparative Analysis of Packaging Cardboard Obtained from Different Types of Cellulose Fibrous Raw Materials

Ismoil S. Sodikov[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [HKV-1291-2023](https://orcid.org/0000-0002-2537-360X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2537-360X>

Natalia V. Shcherbak, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; sodikovismoil@gmail.com[✉], n.sisoeva@narfu.ru

Received on February 11, 2025 / Approved after reviewing on April 23, 2025 / Accepted on April 27, 2025

Abstract. A comparative analysis of the properties of packaging cardboard types manufactured in laboratory conditions from cotton stalk cellulose with industrial samples of cardboard from recycled materials and high-yield semi-finished products produced at Russian paper mills has been presented in the article. The aim of the study has been to assess the possibility of using cotton waste as an additional or alternative raw material for the production of packaging cardboard, especially in cotton-producing countries. The use of cotton stalks as a raw material for the production of paper and cardboard not only solves the problem of agricultural waste, but also provides an opportunity to implement a circular economy model, according to which waste is recycled to produce high-margin materials. Samples of cardboard made from cotton stalk cellulose of 3 types from different manufacturers have been compared: linerboard made from primary fiber at the Arkhangelsk Pulp & Paper Mill; linerboard made from MS-5B waste paper at the Kamenskaya Paper & Board Mill and the “Mayak” Enterprise; linerboard made from eucalyptus waste paper at one of the Brazilian enterprises. To assess the structural characteristics of the samples, a microscopic analysis of the fiber has been carried out, which has made it possible to visualize the differences in the morphological structure of fibers of different nature. It has been established that the cellulose of cotton stalks is geometrically closer to that of eucalyptus waste paper fiber. The fiber length has been 0.75 mm, which is 40 % shorter than that of cardboard samples from the Kamenskaya Paper & Board Mill and the “Mayak” Enterprise and more than 2 times shorter than the average length of cellulose in the composition of cardboard from the Arkhangelsk Pulp & Paper Mill. The samples have been prepared for testing using standard methods in accordance with the requirements of GOST R 57207–2008. An analysis of the physical and mechanical characteristics of the ma-



terials, such as breaking length, bursting strength, etc., has been performed. Given the environmental and economic feasibility of recycling non-wood raw materials, the technology for producing cardboard from cotton stalks represents an important step towards creating more sustainable and competitive materials.

Keywords: cotton stalk cardboard, linerboard, virgin fiber, waste paper fiber, non-wood raw materials, wood raw materials

Acknowledgements: A comparative analysis of packaging types of paper was carried out using the equipment of the Innovative Technology Centre “Modern Technologies for Processing Bioresources of the North” of the Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk.

For citation: Sodikov I.S., Shcherbak N.V. Comparative Analysis of Packaging Cardboard Obtained from Different Types of Cellulose Fibrous Raw Materials. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 142–154. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-142-154>

Введение

На сегодняшний день хлопок выращивается на 32,6 млн га в 111 странах. После сбора хлопка остаются отходы в виде стеблей хлопчатника – 1–2 т/га [19]. С 2021 по 2024 гг. наблюдается глобальный рост потребительского спроса на продукцию хлопководства, достигающий 50 млн т/г. [25]. Хлопок служит различным целям, внося вклад в производство промышленных товаров, таких как брезент, переплет книг, промышленные нитки, вата, марлевые бинты и др. [15].

Объемы мирового производства хлопка демонстрируют стабильный рост. Китай и Индия занимают ведущие позиции в выращивании хлопка-сырца, каждая страна обеспечивает примерно 23 % от общего мирового объема. За ними следуют США, на долю которых приходится около 16,5 %, Бразилия – около 8 % и Узбекистан – около 3 % мирового хлопка [1].

В Китае недавние исследования указывают на ежегодное увеличение хлопковых отходов до более чем 100 млн т, причем значительная часть оказывается на свалках, что вызывает экологическую тревогу, особенно в отношении стеблей хлопка, которые также служат переносчиками вредителей, таких как *Pectinophora gossypiella* (розовый коробочный червь) [22]. Предполагаемая годовая глобальная доступность стеблей хлопчатника колеблется от 90 до 129 млн т, с ожиданием увеличения в будущем. Признавая важность экологической устойчивости, потенциал для переработки сельскохозяйственных отходов следует проиллюстрировать примером стеблей хлопчатника [9]. Традиционные методы утилизации – сжигание – становятся причиной не только выделения значительных количеств парниковых газов, но и потери ценных биохимических соединений, присущих стеблям хлопка [15, 18].

Использование стеблей хлопка в качестве сырья для изготовления бумаги и картона решает проблемы сельскохозяйственных отходов и дает возможность применить на практике модель циклической экономики: отходы вовлекаются в производство с получением материалов с высокой маржинальностью [10, 14, 23]. Это дает возможность увеличить доход от хлопковых культур и сделать их конкурентоспособными по сравнению с биотопливными культурами.

Еще одно преимущество недревесного сырья для развивающихся стран с ограниченными лесными ресурсами состоит в том, что недревесная биомасса

обеспечивает альтернативу импорту древесины, бумаги или целлюлозной массы [8, 13, 17]. Кроме того, в этих странах большая часть территории отведена под продовольственные культуры, что обуславливает значительное количество сельскохозяйственных отходов и развитие агропродовольственной промышленности [11, 12]. Недревесная биомасса повышает добавленную стоимость сельскохозяйственных культур за счет использования отходов для получения продукта, имеющего большой спрос – бумаги и картона [11, 16, 24].

В Туркменистане, например, производят бумагу из хлопчатника с использованием в качестве сырья ежегодно до 50 тыс. т соломы и 22 тыс. т хлопкового лinters [4].

Британская компания Fibe применяет сельскохозяйственные отходы – листья и стебли картофеля – для разработки экологически чистых волокон, подходящих для текстильной промышленности. Эти волокна легко разлагаются в природной среде и подлежат вторичной переработке. При производстве картофельного волокна потребляется на 99,7 % меньше воды и выделяется на 82 % меньше CO₂ по сравнению с традиционным хлопком, что снижает экологический след процесса. Такой подход к использованию сырья поддерживается ведущими модными брендами, заинтересованными во внедрении устойчивых материалов [20].

Таким образом, отходы хлопка могут служить дополнительным или альтернативным сырьем для получения картона, особенно в странах-производителях хлопка. При производстве картона основным сырьем выступают материалы с более жесткими и грубыми волокнами, такие как бурая древесная масса, полцеллюлоза, сульфатная целлюлоза и макулатура [3]. Вопросы применимости стеблей хлопка для производства картона требуют дополнительного исследования, т. к. информация по данному направлению фрагментарна.

Объекты и методы исследования

В качестве образцов были взяты 3 вида картона отечественных производителей и зарубежного: картон-лайнер из первичного волокна Архангельского целлюлозно-бумажного комбината (АЦБК); из макулатуры марки МС-5Б Каменской бумажно-картонной фабрики (Каменская БКФ) и предприятия «Маяк»; картон-лайнер из эвкалиптовой макулатуры одного из предприятий Бразилии. Масса 1 м² каждого из образцов составила 100 г.

Образцы картона-лайнера из стеблей хлопчатника для сравнения с промышленными образцами изготавливали в лабораторных условиях. Из стеблей хлопчатника выделяли целлюлозу, используя режим сульфатной варки, моделирующий получение полуфабриката высокого выхода, применяемого в производстве картонов, адаптированный для недревесных растений [5]. Полученная из хлопчатника целлюлоза отличалась следующими характеристиками: число Каппа – 99,59, разрывная длина – 4353 м, сопротивление продавливанию – 227 кПа, разрушающее усилие при сжатии кольца – 80 Н, сопротивление сжатию на коротком расстоянии – 2,43 кН/м [5].

Для оценки качества целлюлозу размалывали в мельнице PFI при концентрации массы 10 %, до достижения степени помола 30 °ШР в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 «Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям». Гидрофобизирующую проклейку проводили внутримас-

сно с использованием 1%-го раствора катионного крахмала с расходом 15 кг/т и алкилкетен-димерной дисперсии (АКД) – 10 кг/т. Масса образцов принята 100 г/м² для сравнения с промышленными образцами.

Лабораторные образцы изготавливали на комплексе для моделирования анизотропных волокнистых структур, т. е. в динамическом формующем устройстве, что позволило максимально приблизить их структуру к структуре промышленных образцов и соблюдать корректность сравнения показателей качества в 2 взаимно перпендикулярных направлениях – машинном и поперечном. Скорость на динамическом формующем устройстве была задана 1200 м/мин, сушку образцов производили в устройстве контактной сушки при температуре 93 °С. Размеры каждого из полученных образцов составили $\approx 245 \times 900$ мм.

Исследование физико-механических показателей композиционных материалов и подготовка к нему выполнены с применением аппаратов, приборов и методик, описанных в работе [2], в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57207–2008 «Картон для плоских слоев гофрированного картона», ГОСТ 12605–97 «Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)», ГОСТ Р ИСО 9895–2013, ГОСТ 10711–97 «Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца», ГОСТ Р ИСО 2759–2017 «Картон. Метод определения сопротивления продавливанию», ГОСТ Р ИСО 9895-2013 «Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами». Перед испытаниями образцы кондиционировали по ГОСТ Р ИСО 187–2012.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки структурных характеристик исследуемых образцов проведен микроскопический анализ волокна, позволивший визуализировать отличия морфологического строения волокон разной природы (рис. 1). Целлюлоза стеблей хлопчатника имеет признаки, характерные для целлюлозы из лиственных пород, в пробах обнаружены членики сосудов, соответствующие простому типу перфорации, аналогично породам эвкалипта, осины, дуба и т. п. (рис. 1, а). На стенках сосудов выявлены простые мелкие поры, располагающиеся продольными полосами. Отмечены также волокна либриформа, обладающие бумагообразующими свойствами, внешне схожие с волокнами эвкалипта (рис. 1 а, б). Зафиксированы тонкие удлиненные клетки с острыми окончаниями и щелевидными порами. В литературе диагностические признаки волокон стеблей хлопчатника не описаны [6, 7, 19, 21, 26]. По микрофотографиям видно, что картон Каменской БКФ (рис. 1, в) и предприятия «Маяк» (1, д) выполнены из вторичного волокна, о чем свидетельствует степень повреждения клеточной стенки целлюлозных волокон и большое количество загрязнений, приходящих с вторичным волокном: частички старого клея, смолы, краски и пр.

Оценка размерно-структурных характеристик выявила значительное отличие по основным геометрическим показателям волокон стеблей хлопчатника по сравнению с волокнистыми полуфабрикатами, традиционно используемыми в производстве картона на предприятиях РФ.

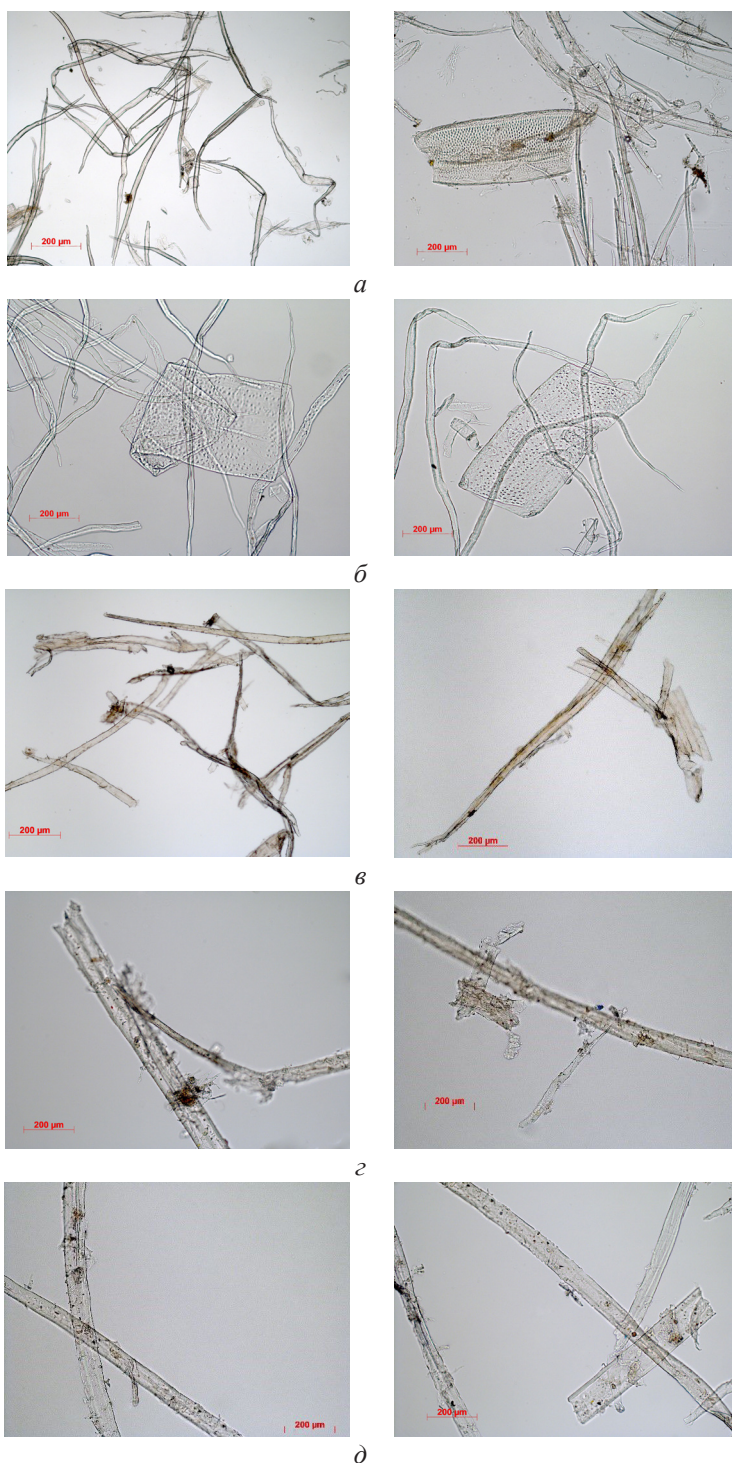


Рис. 1. Микрофотографии целлюлозных волокон в образцах картона разных производителей: *а* – из стеблей хлопчатника; *б* – из эвкалипта; *в* – АЦБК; *г* – Каменская БКФ; *д* – «Маяк»

Fig. 1. The micrographs of cellulose fibers in cardboard samples from different manufacturers: *a* – made from cotton stalks; *б* – made from eucalyptus; *в* – Arkhangelsk Pulp & Paper Mill; *г* – Kamenskaya Paper & Board Mill; *д* – «Mayak» Enterprise

Установлено, что целлюлоза стеблей хлопчатника по геометрическим параметрам ближе к эвкалиптовому волокну. Так, длина волокна составила 0,75 мм, что на 40 % ниже, чем у вторичного волокна в образцах картона предприятия «Маяк» и Каменской БКФ, и более чем в 2 раза меньше по сравнению со средней длиной волокна в композиции картона из первичной целлюлозы АЦБК. Обращает на себя внимание доля мелочи в исследуемых пробах. В образце картона из эвкалиптового волокна отмечено максимальное количество мелочи – 19,2 %, что закономерно вследствие исходной низкой длины эвкалиптового волокна и его неоднократной переработки. В образцах хлопчатника доля мелочи в 2 раза выше, чем в образце картона из первичной целлюлозы. Грубость волокон целлюлозы из стеблей хлопчатника низкая – в 2,5–3,0 раза меньше по сравнению с грубостью волокон вторичного сырья марки МС-5Б и первичной целлюлозы АЦБК при сопоставимых условиях варки полуфабрикатов высокого выхода для картона и числе Каппа [5]. Низкая грубость может стать причиной малого сопротивления сжатию короткого участка образца (табл. 1).

Таблица 1

**Исследование структурно-размерных показателей целлюлозных волокон
в образцах картона разных производителей**
**The investigation of structural and dimensional parameters of cellulose fibers
in cardboard samples from different manufacturers**

Образец	Средние			Грубость, мг/м	Средние			Доля мелочи, %
	длина, мм	ширина, мкм	фактор формы, %		угол излома, ...°	индекс излома, ...°	длина сегмента, мм	
Лабораторный	0,75	23,3	92,4	115	50,1	0,63	0,69	6,1
Каменской БКФ	1,29	28,2	88,7	312	49,1	0,85	1,16	4,9
Предприятия «Маяк»	1,32	28,6	88,9	249	49,4	0,78	1,18	4,2
АЦБК	1,66	30,1	89,1	409	50,5	0,55	1,44	3,1
Бразильского предприятия	0,66	26,2	88,9	170	49,6	1,80	0,56	19,2

Фракционное распределение волокон разной природы продемонстрировано на графике рис. 2. В образцах картона из целлюлозы стеблей хлопчатника и вторичного эвкалиптового волокна доля короткой фракции (до 0,5 мм) составляет 23 и 36 % соответственно, для картонов из макулатуры – не превышает 15 %, а из первичного волокна – не более 6 %. Пропорционально изменяется доля волокон длиной свыше 1,0 мм. Для образцов картона из целлюлозы стеблей хлопчатника показатель составляет 14 %, для картона из вторичного эвкалиптового волокна – 12 %, для картона МС-5Б – 40–43 %, для картона из первичной целлюлозы – более 50 %. Данный факт обосновывается высоким содержанием хвойной целлюлозы в картоне из первичной целлюлозы и в картоне марок МС-5Б. Такое распределение волокон по длине будет обосновывать физико-механические показатели. Длина волокна в первую очередь оказывает влияние на прочность при растяжении и разрывную длину, сопротивление продавливанию: чем выше длина волокна, тем выше эти характеристики.

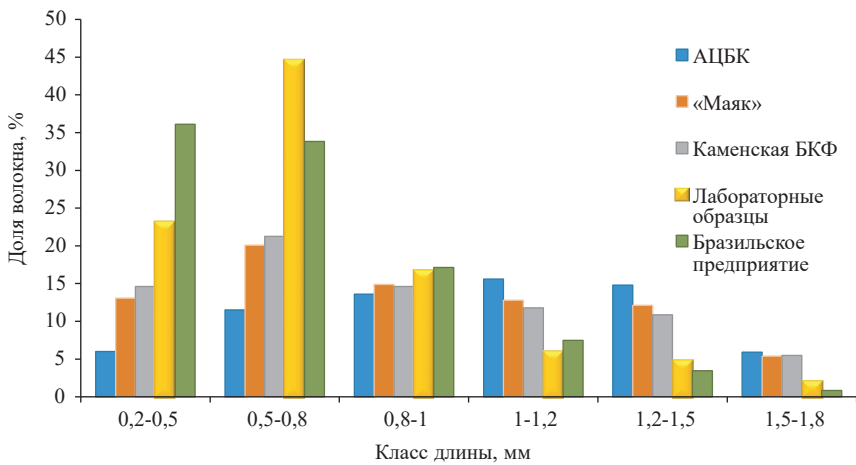


Рис. 2. Фракционное распределение волокон по длине

Fig. 2. The fractional distribution of fibers by length

Влияние вида и свойств волокна на физико-механические характеристики несимбатно (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические показатели картона разных производителей
The physical and mechanical parameters of cardboard from different manufacturers

Показатель	АЦБК		«Маяк»		Каменская БКФ		Лабораторные образцы		Бразильское предприятие	
	CD	MD	CD	MD	CD	MD	CD	MD	CD	MD
Сопротивление продавливанию, кПа	373*		211		182		175		194	
	404		246		202		202		207	
	390		230		189		185		203	
Сопротивление сжатию на коротком расстоянии, кН/м	1,8	3,7	2,1	3,0	2,0	3,0	1,0	2,5	2,1	2,1
	2,2	4,3	2,4	3,4	2,2	3,4	1,2	2,8	2,2	2,3
	2,0	4,2	2,3	3,2	2,0	3,2	1,1	2,6	2,1	2,2
Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	101	131	131	165	126	145	83	127	164	189
	109	145	152	188	136	166	94	145	174	196
	107	142	141	176	134	161	91	135	170	193
Число Кобба	23		37		22		22		31	
	24		39		23		23		32	
	24		38		23		23		31	
Толщина, мкм	144	138	149	147	143	146	196	198	161	163
	150	145	155	156	156	154	206	215	164	168
	148	143	153	152	151	152	201	211	163	167
Разрывная длина, м	3400	10 600	3850	6400	3100	5850	1900	6250	2800	4700
Прочность при растяжении, кН/м	3,33	10,60	4,13	6,73	3,13	6,00	1,80	6,33	2,90	4,90

Примечание: Показатели измерены в поперечном (CD) и машинном (MD) направлениях. *Для ячеек, содержащих 3 значения, верхнее является минимальным, среднее – максимальным, нижнее – средним.

Можно отметить, что у первичного волокна сопротивление продавливанию на 40–50 % выше по сравнению с другими видами картона. Данный факт

обусловлен большой длиной волокон первичной целлюлозы и способностью к межволоконному связеобразованию. Сопротивление сжатию на коротком расстоянии и разрывная длина у картонов из первичного волокна в 1,5–2,0 раза лучше ввиду того, что у первичного волокна более гибкие и эластичные волокна. Известно, что при увеличении количества циклов сушки и как следствие ороговения волокна теряют способность к образованию межволоконной связи.

Низкая грубость непосредственно оказывает влияние на сжатие: у картона из первичных волокон показатель на 24 % выше, чем у картонов из вторичного волокна, и на 38 % – чем у образцов из стеблей хлопчатника.

У картона из стеблей хлопчатника сопротивление продавливанию находится на одном уровне с картонами из вторичных волокон. Разрывная длина и прочность при растяжении лабораторного образца на 25 % выше, чем у картона из вторичного эвкалиптового волокна. Сравнение с картонами из вторичного волокна отечественного производства выявило, что показатели картона, изготовленного в лаборатории, находятся на одном уровне с продукцией предприятия «Маяк» и даже превосходят, если сравнивать с продукцией Каменской БКФ.

Поверхностная впитываемость воды при одностороннем смачивании по методу Кобба у картона из стеблей хлопчатника не уступает по абсолютным значениям картонам промышленного изготовления, что свидетельствует о хорошей способности к проклейке гидрофобизирующим клеем АКД, используемым в лаборатории.

Толщина картонов из стеблей хлопчатника выше, чем картонов из вторичного и первичного волокон. Это можно объяснить условиями их получения в лаборатории без возможности моделирования процессов прессования и каландрирования.

Значимая разница более чем в 3 раза по прочности при растяжении образцов картона лабораторного изготовления в поперечном и машинном направлениях объясняется условиями формования листа на лабораторном динамическом листоотливном аппарате, который создает сильно анизотропные структуры с ориентацией волокна в машинном направлении. Подтверждение данного факта прослеживается по прочности при растяжении. Коэффициент анизотропии, выраженный как отношение MD/CD (разрывная длина / прочность при растяжении) у лабораторных образцов из хлопчатника составил 3,3–3,5, в то время как у образцов из вторичного волокна – 1,6. Рекомендованный уровень анизотропии для тароупаковочных материалов сегодня находится в диапазоне 1,5–2,5. Таким образом, высокий коэффициент обуславливает сильную анизотропию и, как следствие, низкую прочность в поперечном направлении для образцов картона из стеблей хлопчатника. Необходимо отметить большой коэффициент анизотропии (3,1) при измерении прочности при растяжении образцов АЦБК, что не согласуется с требованиями стандарта для плоских слоев гофрированного картона, в котором показатели качества нормируются в поперечном направлении.

Важно отметить, что кроме прочностных свойств для всех типов тары упаковочных картонов имеют особое значение деформационные характеристики, прежде всего способность к удлинению, что связано с условиями эксплуатации. Коробки из гофрированного картона подвергаются, в частно-

сти, растягивающим и изгибающим нагрузкам. Зависимости, продемонстрированные на рис. 3, помогают предсказывать поведение картона в реальных условиях эксплуатации. Из диаграмм растяжения видно, что образцы картона из стеблей хлопчатника имеют высокую способность к удлинению, как в машинном, так и в поперечном направлениях. Таким образом, можно предположить, что данные образцы картона будут пригодны для переработки на гофроагрегатах, где происходит удлинение бумаги при формировании гофр и коробок из гофрированного картона при нанесении на них линий рилевки и биговки.

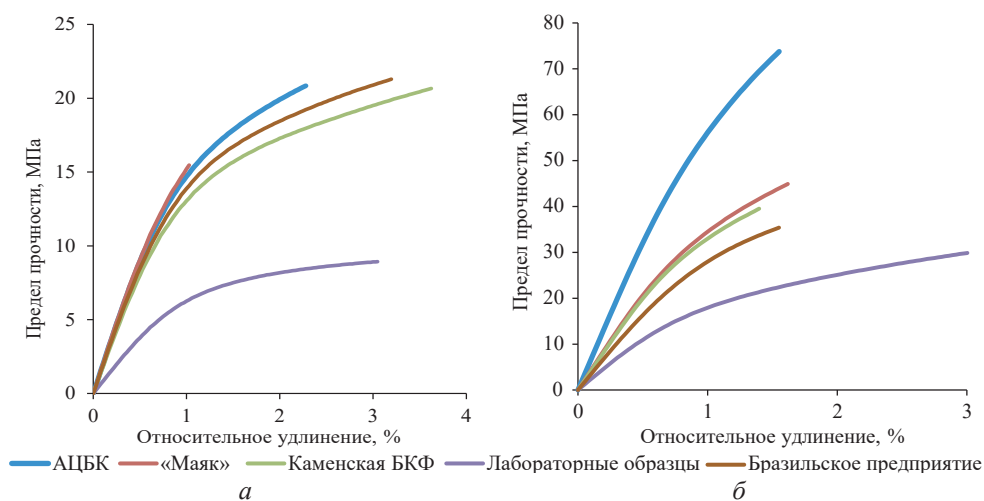


Рис. 3. Диаграммы растяжения в поперечном (а) и машинном (б) направлениях приложения нагрузки

Fig. 3. The stretching diagrams in the transverse (a) and machine (б) directions of the load application

Заключение

Изучение морфологического строения и структурно-размерных показателей волокон целлюлозы из стеблей хлопчатника позволило установить внешнюю схожесть морфологического строения волокон либриформа стеблей хлопчатника, обладающих бумагообразующими свойствами, с эвкалиптовой целлюлозой. Так, на стенках сосудов целлюлозы из стеблей хлопчатника присутствуют простые мелкие поры, располагающиеся продольными полосами. Эта целлюлоза по геометрическим параметрам также сопоставима с эвкалиптовой целлюлозой. Длина волокна целлюлозы из стеблей хлопчатника составила 0,75 мм, а у вторичных волокон из эвкалипта – 0,66 мм.

Морфологическое строение и геометрические размеры целлюлозы из стеблей хлопчатника обосновывают качество изготовленных образцов картона: повышенную способность к удлинению, удовлетворительную прочность при растяжении и сжатии кольца.

Ввиду экологической и экономической целесообразности переработки недревесного сырья технология производства картона из стеблей хлопчатника представляет собой важный шаг к созданию более устойчивых и конкурентоспособных материалов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование переработки и повышение эксплуатационных характери-

стик продукта для расширения его промышленного применения. Проведенные исследования показали рентабельность получения целлюлозы высокого выхода из стеблей хлопчатника с ее последующим применением для изготовления та- роупаковочных видов бумаги и картона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Васильева Е.Р. Современное состояние мирового рынка хлопка и перспективы развития хлопководства в Узбекистане // Гуманитарная миссия обществознания на пороге нового индустриального общества: сб. ст. Междунар. науч. форума. Уфа: Ин-т стратегич. исслед. Респ. Башкортостан, 2020. С. 502–506.

Vasilyeva E.R. Current State of the World Cotton Market and Prospects for the Development of Cotton Production in Uzbekistan. *Humanitarian Mission of Social Science on the Threshold of a New Industrial Society: Collection of Articles from the International Scientific Forum*. Ufa: Institute for Strategic Studies of the Republic of Bashkortostan, 2020, pp. 502–506. (In Russ.).

2. Гурьев А.В., Дубовый В.К., Комаров В.И., Казаков Я.В. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона. СПб.: Политехн. ун-т, 2006. 229 с.

Gur'ev A.V., Duboviy V.K., Komarov V.I., Kazakov Ya.V. *Laboratory Practical Training on Paper and Cardboard Technology*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2006. 229 p. (In Russ.).

3. Джанбекова Л.Р. Особенности волокнистого сырья, используемого в производстве картонов // Вестн. Казанск. технол. ун-та. 2010. № 11. С. 562–564.

Dzhanbekova L.R. Features of Fibrous Raw Materials Used in Cardboard Production. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2010, no. 11, pp. 562–564. (In Russ.).

4. Отраслевой информационный портал. Режим доступа: https://sbo-paper.ru/news/archive_rus/5448/ (дата обращения: 28.10.25).

Industry Information Portal. Available at: https://sbo-paper.ru/news/archive_rus/5448/ (accessed 28.10.25). (In Russ.).

5. Содииков И.С., Щербак Н.В. Получение волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника для упаковочных видов бумаг // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2023. С. 286–289.

Sodikov I.S., Shcherbak N.V. Production of Fibrous Semi-Finished Products from Cotton Stems for Packaging Paper. *Problemy mekhaniki tsellulozno-bumazhnykh materialov* = The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Prof. V.I. Komarov. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University, 2023, pp. 286–289. (In Russ.).

6. Чавчавадзе Е.С., Брянцева З.Е., Гончарова Е.В., Нехлюдова М.В., Горбачева Г.Н., Коржицкая З.А. Атлас древесины и волокон для бумаги / ЦНИИ бумаги; под ред. Е.С. Чавчавадзе. М.: Ключ, 1992. 329 с.

Chavchavadze E.S., Bryantseva Z.E., Goncharova E.V., Nekhlyudova M.V., Gorbacheva G.N., Korzhitskaya Z.A. *Atlas of Wood and Paper Fibers*. Central Research Institute of Paper, ed. by E.S. Chavchavadze. Moscow, Klyuch Publ., 1992. 329 p. (In Russ.).

7. Шлейхер А.И., Шафрин А.Н., Соколов А.Ф., Нармухамедов Н.Н., Нерозин А.Е., Казиев М.З., Панфилова Л.А., Колдаев А.А., Черникова А.Н., Автономов А.И., Автономов В.А. Хлопководство. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1983. 334 с.

Shleikher A.I., Shafrin A.N., Sokolov A.F., Narmukhamedov N.N., Nerozin A.E., Kaziev M.Z., Panfilova L.A., Koldaev A.A., Chernikova A.N., Avtonomov A.I., Avtonomov V.A. *Cotton Growing*: 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Kolos Publ., 1983. 334 p. (In Russ.).

8. Biyada S., Merzouki M., Urbonavičius J. New Resources for Sustainable Thermal Insulation Using Textile and Agricultural Waste in a New Circular Economy Approach. *Processes*, 2023, vol. 11, no. 9, art. no. 2683. <https://doi.org/10.3390/pr11092683>
9. Ding Y., Pang Z., Lan K., Yao Y., Panzarasa G., Xu L., Ricco M.L., Rammer D.R., Zhu J.Y., Hu M., Pan X., Li T., Burgert I., Hu L. Emerging Engineered Wood for Building Applications. *Chemical Reviews*, 2023, vol. 123, iss. 5, pp. 1843–1888. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00450>
10. Duque-Acevedo M., Lancellotti I., Andreola F., Barbieri L., Belmonte-Ureña L.J., Camacho-Ferre F. Management of Agricultural Waste Biomass as Raw Material for the Construction Sector: an Analysis of Sustainable and Circular Alternatives. *Environmental Sciences Europe*, 2022, vol. 34, art. no. 70. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00655-7>
11. Eugenio M.E., Ibarra D., Martín-Sampedro R., Espinosa E., Bascón I., Rodríguez A. Alternative Raw Materials for Pulp and Paper Production in the Concept of a Lignocellulosic Biorefinery. *Cellulose*. IntechOpen Publ., 2019, pp. 1–26. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90041>
12. Fahmy Y., Fahmy T.Y.A., Mobarak F., El-Sakhawy M., Fadl M.H. Agricultural Residues (Wastes) for Manufacture of Paper, Board, and Miscellaneous Products: Background Overview and Future Prospects. *International Journal of ChemTech Research*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 424–448.
13. Ibrahim R.A., Inan H., Fahim I.S. A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Three Cotton Stalk Waste Sustainable Applications. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, art. no. 20781. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47817-y>
14. Jiménez L., Rodríguez A. Valorization of Agricultural Residues by Fractionation of Their Components. *The Open Agriculture Journal*, 2010, vol. 4, pp. 125–134. <https://doi.org/10.2174/1874331501004010125>
15. Kanipandian N., Thirumurugan R. A Feasible Approach to Phyto-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles Using Industrial Crop *Gossypium hirsutum* (Cotton) Extract as Stabilizing Agent and Assessment of its *in vitro* Biomedical Potential. *Industrial Crops and Products*, 2014, vol. 55, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.042>
16. Li H., Sun H., He Z. *Achnatherum inebrians* Straw as a Potential Raw Material for Pulp and Paper Production. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 101, pp. 193–196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.061>
17. Maxwell J.M., Gordon S.G., Huson M.G. Internal Structure of Mature and Immature Cotton Fibers Revealed by Scanning Probe Microscopy. *Textile Research Journal*, 2003, vol. 73, iss. 11, pp. 1005–1012. <https://doi.org/10.1177/004051750307301111>
18. Moore G. *Non Wood Fiber Applications in Papermaking*. UK, Surrey, Pira International, 1996. 208 p.
19. Pandirwar A.P., Khadatkar A., Mehta C.R., Majumdar G., Idapuganti R., Mageshwaran V., Shirale A.O. Technological Advancement in Harvesting of Cotton Stalks to Establish Sustainable Raw Material Supply Chain for Industrial Applications: a Review. *BioEnergy Research*, 2023, vol. 16, pp. 741–760. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10520-3>
20. Press Release 1: Fibe Accelerates Sustainable Fashion Possibilities with Investment Funding and Potato Yarn Breakthrough. *Fibe*. Available at: <https://www.fibe.uk/media> (accessed 31.10.24).
21. Rehman A., Farooq M. Morphology, Physiology and Ecology of Cotton. *Cotton Production*, 2019, chapt. 2, pp. 23–46. <https://doi.org/10.1002/9781119385523.ch2>
22. Rizal S., Abdul Khalil H.P.S., Oyekanmi A.A., Gideon O.N., Abdullah C.K., Yahya E.B., Alfatah T., Sabaruddin F.A., Rahman A.A. Cotton Wastes Functionalized Biomaterials from Micro to Nano: A Cleaner Approach for a Sustainable Environmental Application. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 7, art. no. 1006. <https://doi.org/10.3390/polym13071006>

23. Savio L., Pennacchio R., Patrucco A., Manni V., Bosia D. Natural Fibre Insulation Materials: Use of Textile and Agri-Food Waste in a Circular Economy Perspective. *Materials Circular Economy*, 2022, vol. 4, art. no. 6. <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00043-1>

24. Sigoillot C., Camarero S., Vidal T., Record E., Asther M., Pérez-Boada M., Martínez M.J., Sigoillot J.-C., Asther M., Colom J.F., Martínez A.T. Comparison of Different Fungal Enzymes for Bleaching High-Quality Paper Pulps. *Journal of Biotechnology*, 2005, vol. 115, iss. 4, pp. 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.09.006>

25. Soni B., Hassan E.B., Mahmoud B. Chemical Isolation and Characterization of Different Cellulose Nanofibers from Cotton Stalks. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 134, pp. 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.031>

26. Suomela J., Viljanen M., Svedström K., Wright K., Lipkin S. Research Methods for Heritage Cotton Fibres: Case Studies from Archaeological and Historical Finds in a Finnish Context. *Heritage Science*, 2023, vol. 11, art. no. 175. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01022-2>

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

Научная статья

УДК 676.084.2:66.095.82

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-155-168

Применение катионитов при модификации сульфатного лигнина азотистой кислотой

Ю.Г. Хабаров[✉], д-р хим. наук, проф.; *ResearcherID*: [P-1802-2015](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

Е.А. Скрипников, аспирант; *ResearcherID*: [AFB-6325-2022](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8028-4056>

В.А. Вешняков, канд. хим. наук; *ResearcherID*: [E-3882-2017](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

В.А. Плахин, канд. хим. наук; *ResearcherID*: [AAH-6544-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9143-1663>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; khabarov.yu@mail.ru[✉], frimen1004@mail.ru, v.a.veshnyakov@narfu.ru, v.plahin@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.06.25 / Одобрена после рецензирования 02.09.25 / Принята к печати 05.09.25

Аннотация. Сульфатный лигнин является самым крупнотоннажным техническим лигнином, образующимся при сульфатной варке целлюлозы. По статистике в год образуется порядка 70 млн т такого отхода. Его основное количество утилизируется в системе регенерации химикатов и выработки тепловой энергии. Примерно 10...20 % сульфатного лигнина могут быть использованы для получения разнообразных продуктов, например, в производстве полимеров, низкомолекулярных соединений, выработке активированного угля, резинотехнической промышленности и др. Для этого сульфатный лигнин подвергают различным видам модификаций, в т. ч. и химическим: окислению периодатами, галогенированию, сульфированию, сульфометилированию, нитрованию, нитрозированию и др. В данной статье представлен новый способ модификации сульфатного лигнина азотистой кислотой в водно-диоксановой среде с применением твердофазного катализа. В качестве катализатора применяли содержащие сульфогруппы катионообменные смолы в Н-форме: катионит КУ-2-8 и вофатит. Определены оптимальные расходы реагентов, которые составили 50 % нитрита натрия и 230 % катионита от сульфатного лигнина. Показано, что разработанный способ и известный – с использованием в качестве катализатора серной кислоты, дают симбатные результаты. Изучены молекулярные и электронные спектры модифицированного сульфатного лигнина. На электронных спектрах модифицированного сульфатного лигнина появляется новая, характерная для нитрозогруппы полоса поглощения в области 400...500 нм с максимумом при 451 нм. С помощью деконволюции электронный спектр модифицированного сульфатного лигнина аппроксимируется 6 гауссианами с погрешностью 2,5 %, в то время как для исходного сульфатного лигнина с погрешностью 3,4 % спектр может быть описан с помощью 4 гауссиан. В отличие от ИК-спектра сульфатного лигнина на спектрах модифицированного лигнина возникают новые полосы поглощения при 615, 760, 1330 и 1550 см⁻¹, которые обусловлены наличием колебаний NO-связей.

Ключевые слова: лигнин, сульфатный лигнин, модификация, модифицированный лигнин, азотистая кислота, нитрозирование, твердофазный катализ, электронная спектроскопия, инфракрасная спектроскопия

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0010. Использовано оборудование ЦКП НО «Арктика» САФУ им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Хабаров Ю.Г., Скрипников Е.А., Вешняков В.А., Плахин В.А. Применение катионитов при модификации сульфатного лигнина азотистой кислотой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 155–168. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-155-168>

Original article

The Use of Cationites in the Modification of Kraft Lignin with Nitrous Acid

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>

Evgeniy A. Skripnikov, Postgraduate Student; ResearcherID: [AFB-6325-2022](https://orcid.org/0009-0007-8028-4056),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8028-4056>

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>

Vadim A. Plakhin, Candidate of Chemistry; ResearcherID: [AAH-6544-2020](https://orcid.org/0000-0001-9143-1663),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9143-1663>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; khabarov.yu@mail.ru[✉], frimen1004@mail.ru, v.a.veshnyakov@narfu.ru, v.plahin@narfu.ru

Received on June 10, 2025 / Approved after reviewing on September 2, 2025 / Accepted on September 5, 2025

Abstract. Kraft lignin is the largest-tonnage technical lignin formed during kraft pulp cooking. According to statistics, approximately 70 mln t of such waste are generated annually. Most of it is disposed of in the system of chemicals recovery and thermal energy generation. Approximately 10...20 % of kraft lignin can be used to obtain a variety of products, for example, in the production of polymers, low-molecular compounds, activated carbon production, rubber industry, etc. For this purpose, kraft lignin is subjected to various types of modifications, including chemical ones: periodate oxidation, halogenation, sulfonation, sulfomethylation, nitration, nitrosation, etc. This article presents a new method for modification of kraft lignin with nitrous acid in a water-dioxane medium using solid-phase catalysis. The cation-exchange resins in H-form containing sulfogroups (cationite KU-2-8 and wofatite) have been used as catalysts. The optimal reagent consumption has been determined to be 50 % sodium nitrite and 230 % cationite from kraft lignin. It has been shown that the developed method and the well-known one using sulfuric acid as a catalyst give similar results. The molecular and electronic spectra of modified kraft lignin have been studied. In the electronic spectra of modified kraft lignin, a new absorption band appears characteristic of the nitroso group in the region of 400...500 nm with a maximum at 451 nm. By deconvolution, the electronic spectrum of modified kraft lignin is approximated by 6 Gaussians with an error of 2.5 %, while for the initial kraft lignin the spectrum can be described by 4 Gaussians with an error of 3.4 %. In contrast to the IR spectrum of kraft lignin, new absorption bands appear in the spectra of modified lignin at 615, 760, 1,330 and 1,550 cm⁻¹, which are due to vibrations of NO bonds.

Keywords: lignin, kraft lignin, modification, modified lignin, nitrous acid, nitrosation, solid-phase catalysis, electron spectroscopy, infrared spectroscopy



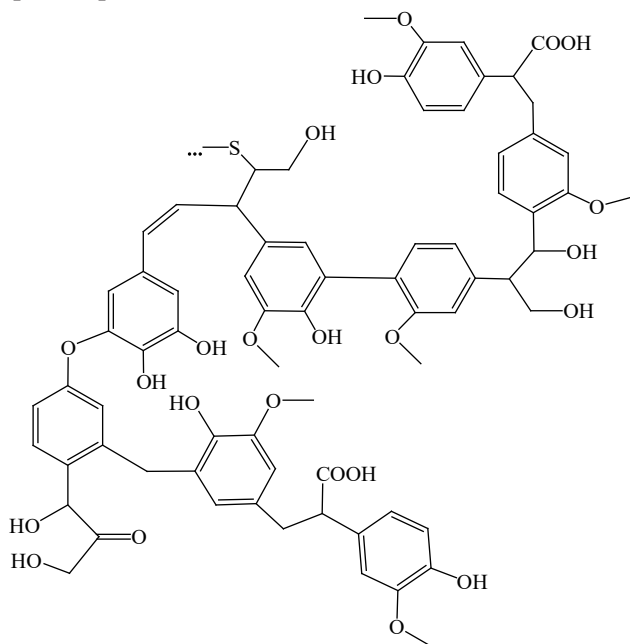
Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FSRU-2024-0010. The equipment from the Centre for Collective Use of Scientific Equipment “Arktika” of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

For citation: Khabarov Yu.G., Skripnikov E.A., Veshnyakov V.A., Plakhin V.A. The Use of Cationites in the Modification of Kraft Lignin with Nitrous Acid. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 155–168. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-155-168>

Введение

Ежегодно в мире образуется порядка 70 млн т сульфатного лигнина (СЛ) [17, 19], являющегося основным видом технических лигнинов. СЛ характеризуется сложной структурой, широким набором различных функциональных групп, в т. ч. серосодержащих:



Применение сульфатного лигнина. СЛ в основном используется в системе регенерации химикатов (сульфида и гидроксида натрия) и выработки технологического пара и энергии [15, 32, 33]. Существуют и другие направления его практического применения.

Газификация – это термохимический процесс с преобразованием углеродсодержащего сырья в синтез-газ при повышенных температурах с использованием кислорода, водяного пара или диоксида углерода [30]. Газификация черного щелока, направленная на производство биотоплива, является эффективным методом получения синтез-газа, который может быть переработан в различные виды топлива и химические вещества [23].

Новый подход к превращению сульфатного лигнина в полезные продукты – его совместная переработка с ископаемым сырьем на установках, перерабатывающих более тяжелые традиционные углеводородные фракции на нефтеперерабатывающих заводах [9].

Гидротермальное ожижение – технология переработки влажных смесей органических веществ при температуре 250–450 °С и приложении нагрузки 4–25 МПа, во время такой переработки происходят реакции разложения и деполимеризации органических макромолекул. При использовании сульфатного лигнина в виде черного щелока (или после его предварительного выделения) получают биомасла. Выход масла по углероду может достигать 80 % [24], кроме того, образуется смесь газов и продуктов обугливания. Преимуществом данного метода является то, что использованный лигнин или биомассу не нужно предварительно высушивать.

Ожижение лигнина может проводиться с этерификацией насыщенными карбоновыми кислотами с длиной углеродной цепи не менее 8 С-атомов [20]. Этерифицированные лигнины в разной степени растворимы в различных растворителях, в т. ч. в газойлях, распространенных в нефтеперерабатывающей промышленности. На растворимость такого лигнина влияет степень этерификации [13, 29].

Многочисленные свойства, присущие лигнину, позволяют использовать его вместо химикатов, полимеров или производных на основе ископаемого топлива при изготовлении различных материалов. Полифенольный характер лигнина обуславливает его антиоксидантные свойства, что делает его привлекательным в качестве УФ-стабилизирующего компонента [25–27, 31] и антиоксиданта [11], имеющего значительный потенциал для применения в смеси с другими полимерами [12]. Кроме того, в ароматической структуре лигнина есть алифатические и фенольные гидроксильные группы, что делает его способным подвергаться биологическому разложению [10, 18].

Гидрокселирование бензильных атомов углерода приводит к появлению гидроксильных групп, повышающих реакционную способность вещества по отношению к изоцианатам, что улучшает его характеристики до сопоставимых с коммерчески доступными аналогами при производстве полиуретанов [8, 28].

Фенолформальдегидные смолы, полученные в результате частичной замены фенола деметилированным лигнином при производстве фанеры, выделяют меньше формальдегида, характеризуются лучшей адгезией и быстрее отверждаются [35].

Эпоксидные смолы являются термореактивными материалами, мировой рынок которых в 2021 г. достиг 3,5 млн т. При производстве эпоксидов СЛ представляет собой безопасную альтернативу токсичному бисфенолу-А – основному сырью для производства эпоксидных термореактивных материалов [27].

Кроме того, СЛ находит применение при получении термопластов, наполнителей, композитов [14, 31], при производстве биопластиков, биокомпозитов для 3D-печати, углеродных волокон, поверхностно-активных веществ, клеев, гидрогелей и пенопластов [21, 22, 37].

Модификация сульфатного лигнина. Для расширения областей использования СЛ часто прибегают к его модификации. К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвященных модификации и применению СЛ, включая введение в смесь азотсодержащих функциональных групп [29].

В работе [7] модифицированный СЛ использовался как эффективный ингибитор нежелательной термополимеризации при переработке пирококденсатов. СЛ модифицировали путем нитрования нитрит-нитратной смесью.

Химическая модификация СЛ ароматическими аминокислотами изучена в ходе исследования [3]. Использована ацилирующая смесь ароматических аминокислот с толуолом и тионилхлоридом. Получены кинетические зависимости и определены термодинамические параметры, а также общая энергия активации процесса.

Еще одним направлением модификации СЛ является окисление перидатом натрия. Реакция протекает в мягких условиях, а полученный продукт превосходит другие сорбенты на основе лигнинов при детоксикации мест проливов ракетных топлив на основе 1,1-диметилгидразина, а также очистки содержащих его сточных вод [1].

Существует патент на модификацию СЛ, позволяющий эффективно получать нитропроизводные ацелированного сульфатного лигнина. Способ основан на использовании смеси азотной кислоты с уксусным ангидридом и предварительном растворении СЛ в диоксане [2].

Цель – разработка метода нитрозирования сульфатного лигнина с помощью реакции электрофильного замещения, проводимой в гомогенных условиях и катализируемой катионитами.

Объекты и методы исследования

Реактивы и материалы. При выполнении исследования использованы реактивы квалификации ч.д.а.: NaNO_2 , NaOH , H_2SO_4 (96 %), HCl (35 %), диоксан, уксусная кислота (10 %). Катиониты в Н-форме: КУ-2-8 и вофатит. Хвойный сульфатный лигнин был выделен с помощью серной кислоты из производственного черного щелока, освобожден от водорастворимых и экстрактивных веществ [34]. Элементный состав СЛ (%): С (65,8), Н (6,2), S (3,2), О (24,8).

Методика подготовки и регенерации катионообменной смолы. Применяли катионообменную смолу КУ-2-8 в Н-форме влажностью 54,6 %. Регенерацию проводили по ГОСТ 20298–74.

Методика нитрозирования СЛ в водно-диоксановой среде. Нитрозирование СЛ проводили при постоянном перемешивании реакционной смеси на виброустановке при комнатной температуре следующим образом. Готовили растворы СЛ (0,2 г) в диоксане (3 мл) и нитрита натрия в воде с заданными концентрациями. В колбе смешивали раствор 0,2 г СЛ в 3 мл диоксана с заданными объемами водного раствора нитрита натрия концентрацией 7,5 % и воды для постоянного объема реакционной смеси. Затем добавляли заданную навеску катионита в Н-форме. Для контроля реакции в мерные колбы, в которые предварительно было долито 2,5 мл 1 М раствора NaOH , через заданные промежутки времени отбирали по 0,1 мл реакционной смеси. Объем раствора доводили до 25 мл дистиллированной водой и после этого измеряли оптическую плотность.

Методика регистрации электронных спектров. Перед записью электронных спектров продуктов реакции готовили исходный раствор, для чего в мерную колбу вместимостью 25 мл вносили 1 мл реакционной смеси, 2 мл 1 М раствора NaOH и объем раствора доводили до 25 мл дистиллированной водой. Для приготовления щелочного раствора в мерную колбу вместимостью 25 мл вносили 2 мл исходного раствора, 2,5 мл 1 М раствора NaOH и объем раствора доводили до 25 мл дистиллированной водой. При приготовлении кислого

раствора вместо раствора NaOH использовали 2,5 мл 10%-го раствора H_2SO_4 . Спектры ионизации получали вычитанием спектра кислого раствора из спектра щелочного раствора.

Спектры регистрировали на спектрофотометре Shimadzu UV-1900i (Япония) в диапазоне длин волн 230...550 нм относительно дистиллированной воды, используя кварцевые кюветы с толщиной рабочего слоя 10 мм.

Методика измерения оптической плотности. Измерение проводили на фотометре «Эксперт-003» (Россия) при длине волны 430 нм (A_{430}) относительно дистиллированной воды в кювете с толщиной рабочего слоя 10 мм.

Методика регистрации ИК-спектров. Для регистрации молекулярных спектров после завершения реакции катионит отделяли от раствора. Промывали небольшим количеством воды, упаривали объединенную жидкую фазу в вакууме и затем высушивали в вакуум-эксикаторе.

ИК-спектры записывали в диапазоне волновых чисел 4000...600 cm^{-1} на ИК-Фурье спектрофотометре Shimadzu FTIR-8400 S (Япония) с помощью приставки нарушенного полного внутреннего отражения PIKE MIRacle (США). Полученные спектры обрабатывали с помощью ATR-коррекции.

Результаты исследования и их обсуждение

Лигносультфоновые кислоты хорошо растворимы в водной среде в широком диапазоне pH, что позволяет проводить химические реакции, в т. ч. нитрозирование, в гомогенных условиях [5]. В водной среде СЛ легко растворяется в щелочах, что затрудняет электрофильные реакции, такие как нитрование и нитрозирование. Поэтому для проведения реакции нитрозирования СЛ в гомогенных условиях было решено использовать бинарный растворитель – вода-диоксан.

Для синтеза нитрозированного СЛ, не содержащего катионов металлов, использовали катиониты в Н-форме, которые выполняли 2 функции. Во-первых, они являлись катализаторами реакции, а во-вторых позволяли удалить из реакционной среды катионы металлов.

Так как при нитрозировании ароматических соединений сильно изменяются их окраска и электронные спектры [36], то при изучении нитрозирования СЛ в качестве основного метода контроля протекания реакции была использована электронная спектроскопия. Для выбора длины волны записаны электронные спектры сульфатного лигнина – исходного и нитрозированного – в водно-диоксановой среде (рис. 1).

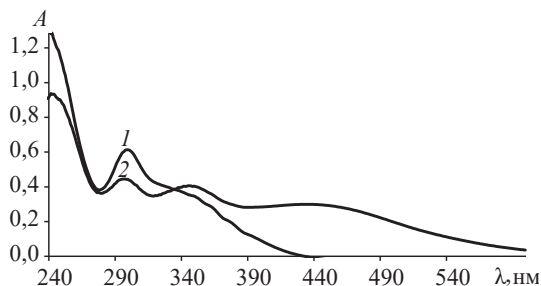


Рис. 1. Электронные спектры СЛ: исходного (1) и нитрозированного (2).
 A – оптическая плотность;
 λ – длина волны

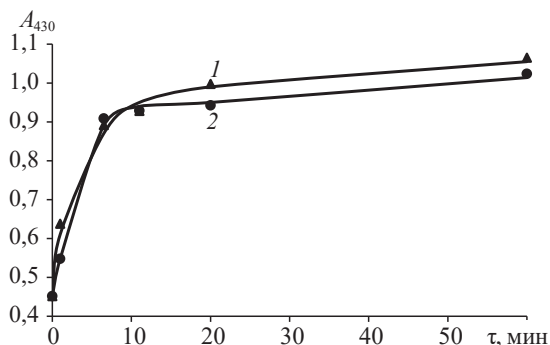
Fig. 1. The electronic spectra of kraft lignin: initial (1) and nitrosated (2).
 A – absorbance; λ – wavelength

Как видно из рис. 1, на электронных спектрах нитрозированного СЛ в области 430...450 нм появляется интенсивная полоса поглощения. Поэтому в дальнейшем использовали фотометрию при 430 нм.

Динамика реакции нитрозирования. При проведении реакции нитрозирования с катионитом КУ-2-8 была оценена динамика протекания реакции. Кроме того, для сравнения осуществлено нитрозирование с использованием 10%-й серной кислоты при одинаковых расходах СЛ и нитрита натрия. Как видно из рис. 2, реакция практически полностью протекает за 10...20 мин и не зависит от типа катализатора, за последующие 40 мин прирост оптической плотности при 430 нм составил всего 9 %.

Рис. 2. Кинетические кривые нитрозирования СЛ при использовании H_2SO_4 (1) и катионита КУ-2-8 (2). τ – продолжительность процесса

Fig. 2. The kinetic curves of kraft lignin nitrosation using H_2SO_4 (1) and cationite KU-2-8 (2). τ – duration of the process



Влияние расхода нитрита натрия. Расход нитрита натрия варьировали в диапазоне 18,8...75,0 % от массы СЛ при использовании навески катионита КУ-2-8 массой 1 г. Рис. 3 показывает, что при максимальном расходе нитрита натрия после 5 мин реакции оптическая плотность изменяется незначительно. При расходе нитрита натрия 56 % реакция проходит медленнее, но к 20 мин оптические плотности достигают одинакового значения. При расходах 18,8 и 37,5 % реакция проходит еще медленнее, что связано, вероятно, с полным расходом нитрита натрия.

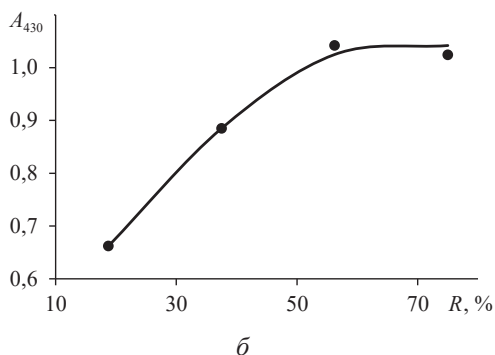
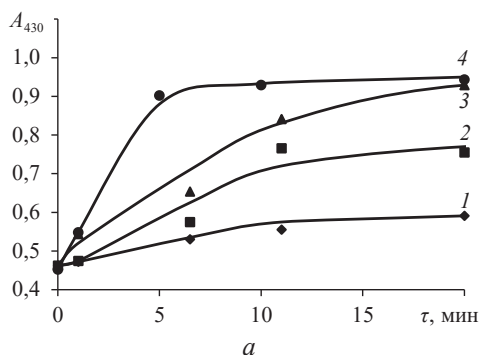


Рис. 3. Кинетические кривые нитрозирования СЛ при расходах R (% от массы СЛ) NaNO_2 : 18,8 (1); 37,5 (2); 56 (3); 75 (4) (а) и изменение оптической плотности при 430 нм в зависимости от расхода NaNO_2 в конечной точке (60 мин) нитрозирования СЛ (б)

Fig. 3. The kinetic curves of kraft lignin nitrosation at consumption rates R (% of kraft lignin weight) of NaNO_2 : 18.8 (1); 37.5 (2); 56 (3); 75 (4) (a) and the change in absorbance at 430 nm depending on the NaNO_2 consumption at the end point (60 min) of kraft lignin nitrosation (b)

Зависимость начальной скорости, рассчитанной на активном участке, от расхода нитрита натрия приведена на рис. 4. Как видно, увеличение расхода

нитрита приводит к нелинейному ускорению реакции нитрозирования: при повышении расхода нитрита натрия с 56 до 75 % начальная скорость возрастает практически в 3 раза.

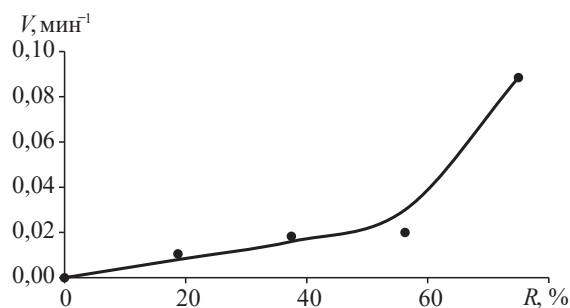


Рис. 4. Влияние расхода NaNO_2 на начальную скорость V реакции нитрозирования

Fig. 4. The influence of NaNO_2 consumption on the initial velocity V of the nitrosation reaction

Влияние расхода катионита. Расход катионита варьировали в диапазоне 27...400 % (влажного катионита) при расходе 7,5%-го раствора нитрита натрия равном 2 мл. Как видно из рис. 5, увеличение расхода катионита приводит к некоторому ускорению реакции нитрозирования (рис. 6). К завершению реакции оптические плотности оказались одинаковыми при расходах 270 и 400 % сухого катионита от СЛ.

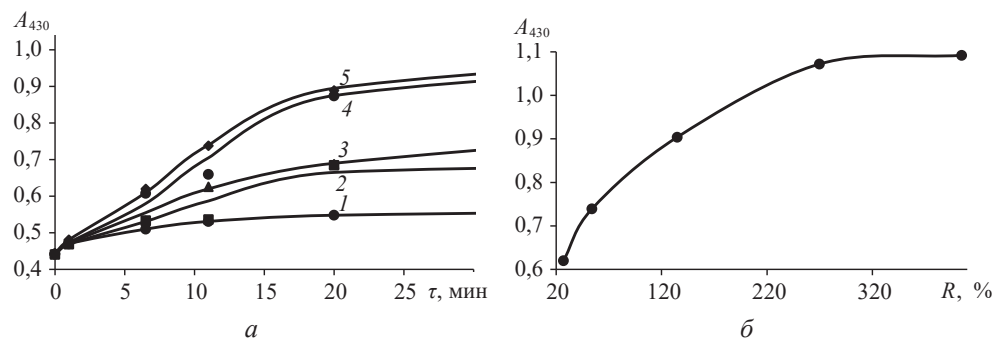


Рис. 5. Кинетические кривые нитрозирования СЛ при расходах КУ-2-8 (% от массы СЛ): 27(1); 54(2); 135(3); 270 (4); 400 (5) (а) и изменение оптической плотности при 430 нм от расхода катионита (% от СЛ) в конечной точке (60 мин) нитрозирования СЛ (б)

Fig. 5. The kinetic curves of kraft lignin nitrosation at KU-2-8 consumption rates (% of kraft lignin weight): 27 (1); 54 (2); 135 (3); 270 (4); 400 (5) (a) and the change in absorbance at 430 nm from the cationite consumption rate (% of kraft lignin) at the end point (60 min) of kraft lignin nitrosation (b)

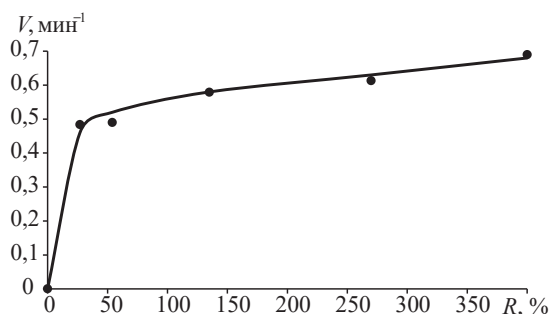


Рис. 6. Зависимость начальной скорости реакции нитрозирования от расхода катионита

Fig. 6. The dependence of the initial rate of nitrosation reaction on the cationite consumption

Нитрозирование с вофатитом. Рынок катионитов весьма разнообразен, поэтому был проведен эксперимент с использованием в качестве катализатора

катионита вофатита (сульфокислая катионообменная смола феноло-альдегидного типа). Как и ожидалось, результаты, полученные с использованием вофатита, близки к результатам нитрозирования с применением в качестве катализатора катионита КУ-2-8 в аналогичных условиях (рис. 7).

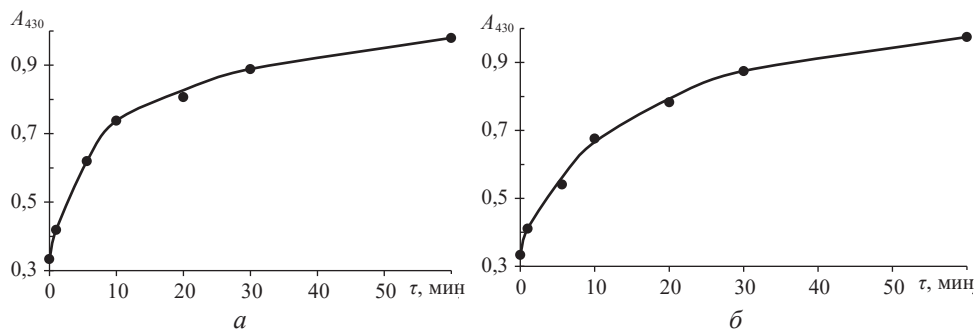


Рис. 7. Кинетические кривые нитрозирования СЛ при расходах NaNO_2 75 % и катионита 400 % от СЛ: КУ-2-8 (а) и вофатит (б)

Fig. 7. The kinetic curves of kraft lignin nitrosation at NaNO_2 consumption of 75 % and cationite – 400 % of kraft lignin: KU-2-8 (a) and wofatite (b)

Свойства нитрозированного СЛ. В ходе нитрозирования СЛ в водно-диоксановой среде с использованием твердофазного катализа происходят значительные изменения, что проявляется в виде новых полос поглощения на электронных спектрах. Нитрозогруппа как сильный электроноакцептор оказывает существенное влияние на распределение электронной плотности в бензольном кольце фенолпропановых единиц лигнина. В результате такого влияния усиливаются кислотные свойства фенольных групп. На рис. 8 приведены электронные спектры ионизации исходного и нитрозированного СЛ. Концентрации исходного и модифицированного СЛ в фотометрируемых растворах составили 78 и 75 мг/л соответственно.

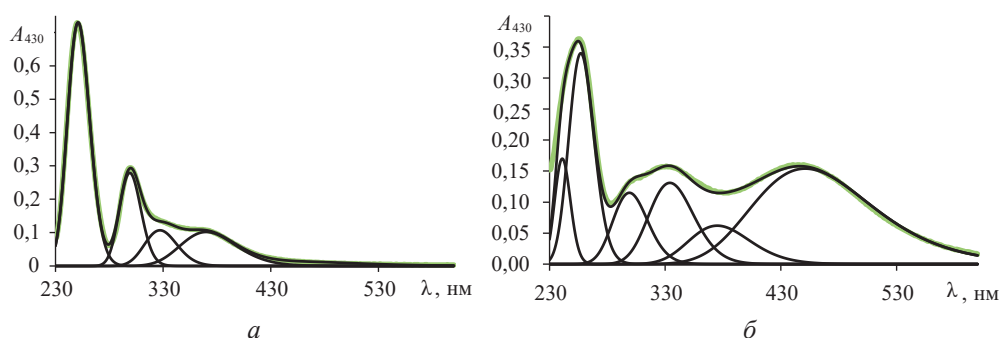


Рис. 8. Электронные спектры ионизации исходного (а) и нитрозированного (б) СЛ. Зеленым цветом обозначен экспериментальный спектр, черным – индивидуальные гауссианы и суммарный спектр

Fig. 8. The electronic ionization spectra of the initial (a) and nitrosated (b) kraft lignin. The experimental spectrum is indicated in green, the individual Gaussians and the total spectrum are indicated in black

Электронный спектр СЛ является типичным для большинства водорастворимых лигнинов [6]. При деконволюции с помощью кривой Гаусса электронный спектр исходного СЛ описывается 4 гауссианами, а для описа-

ния спектра ионизации модифицированного СЛ потребовалось 6 гауссиан. Характеристика индивидуальных полос поглощения (гауссиан) приведена в таблице.

Характеристика гауссиан, получаемых деконволюцией спектров ионизации
The characteristics of Gaussians obtained by deconvolution of ionization spectra

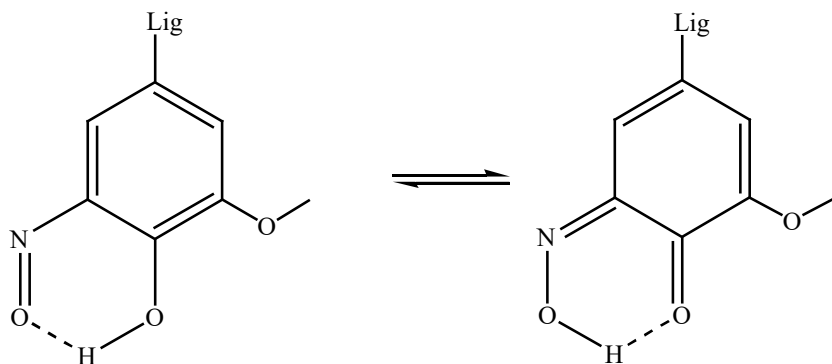
Лигнин	Характеристика полосы	Значение характеристики для полосы					
		1	2	3	4	5	6
Исходный	λ , нм	—	251	299	327	370	—
	σ , см ⁻¹	—	3500	2400	3000	4000	—
	A_{\max}	—	0,730	0,279	0,107	0,102	—
Модифицированный	λ , нм	241	257	299	334	375	451
	σ , см ⁻¹	2500	3500	3600	3700	4000	5400
	A_{\max}	0,170	0,340	0,340	0,131	0,062	0,154

Примечание: σ – ширина полосы на половине интенсивности ($A_{\max}/2$).

Полосы поглощения при 251 и 299 нм связаны с поглощением фенольных ОН-групп, а поглощение в области 370 нм обусловлено поглощением альдегидных или кетонных групп, сопряженных с бензольным ядром фенилпропановой единицы. Полоса поглощения при 327 нм к настоящему времени не может быть достоверно отнесена к какой-либо структуре или функциональной группе. Погрешность аппроксимации спектра исходного СЛ составила 3,4 %.

Для спектра модифицированного СЛ наряду с теми же полосами поглощения, как у исходного СЛ (257, 299, 375 нм), потребовалось 2 дополнительных полосы поглощения с максимумами при 241 и 451 нм. Полоса поглощения при 451 нм обусловлена NO-группой, сопряженной с бензольным ядром [16]. Полоса при 241 нм не идентифицирована. Погрешность аппроксимации спектра модифицированного СЛ составила 2,5 %.

Интенсивность полосы поглощения при 257 нм в 2,15 раза меньше, чем у исходного СЛ, а полосы при 370 нм – в 1,67 раза. В то же время для полосы при 299 нм интенсивность увеличилась на 20 %. По-видимому, такие изменения в электронных спектрах обусловлены характерной для нитрозофенолов таутомерией между нитрозо- и хинонмонооксимной формами.



Кроме электронных спектров были записаны ИК-спектры исходного СЛ и модифицированного с помощью твердофазного катализа, которые приведены на рис. 9.

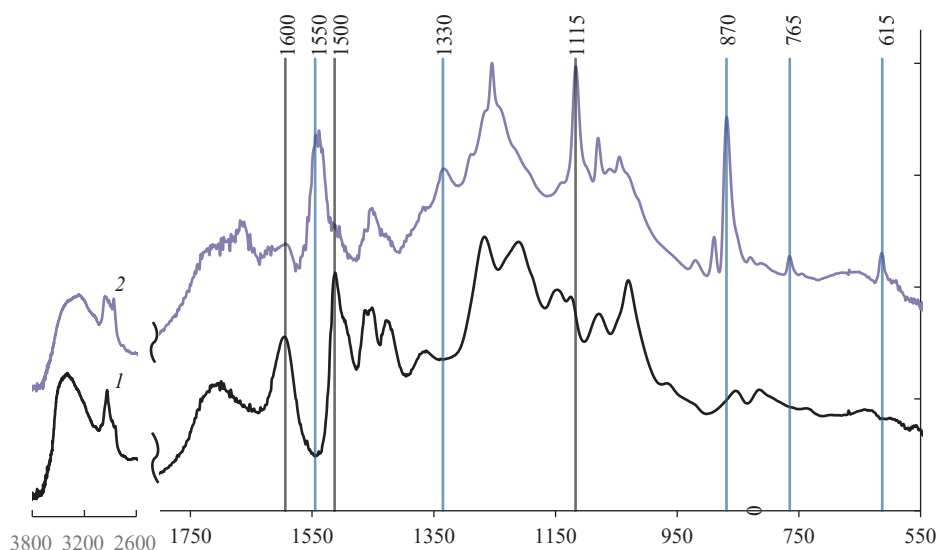


Рис. 9. ИК-спектры СЛ: исходного (1) и модифицированного (2)

Fig. 9. The IR spectra of kraft lignin: initial (1) and modified (2)

При расшифровке инфракрасных спектров использовали справочные данные [4, 34]. На спектрах присутствуют полосы поглощения (см^{-1}), относящиеся к разным структурным элементам:

615, 765.....	органические нитриты (цис-форма)
1250.....	C–N, C–O связь в ароматических или алифатических соединениях; также характерно для N–O
1330.....	нитро- или нитрозогруппы
1500, 1600.....	скелетные колебания ароматического кольца
1550.....	нитрозосоединения C–N=O
2929.....	валентные колебания C–H-связей в метильных и метиленовых группах
3500...3400.....	валентные колебания OH-групп, вовлеченных в водородную связь

Выявленные полосы поглощения при 615, 765, 1330 и 1550 см^{-1} свидетельствуют о присутствии в структуре модифицированного СЛ нитрозогрупп. При этом остались не идентифицированы полосы при 870 и 1115 см^{-1} .

Выводы

1. Разработан катализируемый катионитами метод модификации сульфатного лигнина, основанный на реакции электрофильного замещения с азотистой кислотой в бинарном растворителе вода–диоксан, позволяющий получать свободный от катионов модифицированный сульфатный лигнин.

2. С помощью электронной спектроскопии показано, что расходы реагентов для достижения максимальной полноты протекания реакции составили: катионита – 230 % от количества сульфатного лигнина, а NaNO_2 – 50 %. При увеличении расхода нитрита натрия наблюдается рост начальной скорости реакции.

3. Сравнение нитрозирования сульфатного лигнина с применением катионитов и серной кислоты показало, что реакция проходит симбатно. Активная

фаза реакции продолжается в течение 10...20 мин. Расхождение значений оптических плотностей не превышают 5–10 %.

4. Нитрозирование сульфатного лигнина приводит к изменению спектральных характеристик продукта реакции. На электронных и молекулярных спектрах возникают новые полосы поглощения, которые обусловлены появлением нитрозогрупп. Новые полосы поглощения при 451 нм на электронных и при 615, 765, 1330 и 1550 см⁻¹ на молекулярных спектрах являются следствием появления NO-групп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кожевников А.Ю., Ульяновская С.Л., Семушина М.П., Покрышкин С.А., Ладесов А.В., Пиковской И.И., Косяков Д.С. Модификация сульфатного лигнина периодатом натрия с целью получения сорбента 1,1-диметилгидразина // Журн. приклад. химии. 2017. Т. 90, № 4. С. 416–422.

Kozhevnikov A.Yu., Ul'yanovskaya S.L., Semushina M.P., Pokryshkin S.A., Ladosov A.V., Pikovskoi I.I., Kosyakov D.S. Modification of Sulfate Lignin with Sodium Periodate to Obtain Sorbent of 1,1-Dimethylhydrazine. *Zhurnal prikladnoy khimii* = Russian Journal of Applied Chemistry, 2017, vol. 90, pp. 516–521. <https://doi.org/10.1134/S1070427217040048>

2. Патент 2753533 РФ. С07G 1/00 (2021.05); С08H 6/00 (2021.05). Способ модификации сульфатного лигнина / А.Ю. Гаркотин, Ю.Г. Хабаров, В.А. Вешняков // Бюл. 2021. № 23.

Garkotin A.I., Khabarov I.G., Veshniakov V.A. *Method for Modifying Kraft Lignin*. Patent. RF, no. RU 2753533 C1, 2021. (In Russ.).

3. Протопопов А.В., Клевцова М.В. Химическая модификация сульфатного лигнина ароматическими аминокислотами // Ползуновск. вестн. 2014. № 3. С. 42–44.

Protopopov A.V., Klevtsova M.V. Chemical Modification of Sulfate Lignin with Aromatic Amino Acids. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 42–44. (In Russ.).

4. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М., 2012. 55 с.

Tarasevich B.N. *IR Spectra of the Main Classes of Organic Compounds. Reference Materials*. Moscow, 2012. 55 p. (In Russ.).

5. Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Плахин В.А., Скрипников Е.А., Овчинников Д.В. Нитрозирование лигносульфонатов в условиях твердофазного катализа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 175–187.

Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Plakhin V.A., Skripnikov E.A., Ovchinnikov D.V. Nitrosation of Lignosulfonates under Solid-Phase Catalysis Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 175–187. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-175-187>

6. Хабаров Ю.Г., Кузяков Н.Ю., Вешняков В.А., Комарова Г.В., Гаркотин А.Ю. Исследование нитрования сульфатного лигнина в гомогенных условиях с помощью электронной спектроскопии // Изв. Акад. наук. Сер.: Химическая. 2016. Т. 65, № 12. С. 2925–2931.

Khabarov Yu.G., Kuzyakov N.Yu., Veshnyakov V.A., Komarova G.V., Garkotin A.Yu. Nitration of Sulfate Lignin under Homogeneous Conditions Studied by Electron Spectroscopy. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya: Khimicheskaya* = Russian Chemical Bulletin, 2016, vol. 65, pp. 2925–2931. <https://doi.org/10.1007/s11172-016-1679-2>

7. Хай Д.Т.Т., Гоготов А.Ф., Тай Д.Т. Нитрит-нитратная модификация лигнина как способ получения ингибиторов термополимеризации пироконденсатов // Вестн. ИрГТУ. 2011. № 4(51). С. 100–104.

Hai D.T.T., Gogotov A.F., Tai D.C. Nitrite-Nitrate Modification of Lignin as a Method to Obtain Pyrocondensate Thermopolymerization Inhibitors. *Vestnik Irkutskogo gosudarst-*

vennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2011, no. 4(51), pp. 100–104. (In Russ.).

8. Ahvazi B., Wojciechowicz O., Ton-That T.-M., Hawari J. Preparation of Lignopolymers from Wheat Straw Soda Lignin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, vol. 59, iss. 19, pp. 10505–10516. <https://doi.org/10.1021/jf202452m>

9. Argyropoulos D.D.S., Crestini C., Dahlstrand C., Furusjö E., Gioia C., Jedvert K., Henriksson G., Hultberg C., Lawoko M., Pierrou C., Samec J.S.M., Subbotina E., Wallmo H., Wimby M. Kraft Lignin: A Valuable, Sustainable Resource, Opportunities and Challenges. *ChemSusChem*, 2023, vol. 16, iss. 23, art. no. e202300492. <https://doi.org/10.1002/cssc.202300492>

10. Bai L., Greca L.G., Xiang W., Lehtonen J., Huan S., Nugroho R.W.N., Tardy B.L., Rojas O.J. Adsorption and Assembly of Cellulosic and Lignin Colloids at Oil/Water Interfaces. *Langmuir*, 2019, vol. 35, iss. 3, pp. 571–588. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01288>

11. Bass G.F., Epps T.H. Recent Developments towards Performance-Enhancing Lignin-Based Polymers. *Polymer Chemistry*, 2021, vol. 12, no. 29, pp. 4130–4158. <https://doi.org/10.1039/D1PY00694K>

12. Blanco I., Cicala G., Latteri A., Saccullo G., El-Sabbagh A.M.M., Ziegmann G. Thermal Characterization of a Series of Lignin-Based Polypropylene Blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, pp. 147–153. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5596-2>

13. Dahlstrand C., Orebom A., Samec J., Sawadjoon S., Löfstedt J. *Composition Comprising Derivatized Lignin for Fuel Production*. Patent Application, no. WO 2016204682, 2016.

14. Di Francesco D., Rigo D., Reddy Baddigam K., Mathew A.P., Hedin N., Selva M., Samec J.S. A New Family of Renewable Thermosets: Kraft Lignin Poly-adipates. *ChemSusChem*, 2022, vol. 15, iss. 11, art. no. e202200326. <https://doi.org/10.1002/cssc.202200326>

15. Duval A., Lawoko M. A Review on Lignin-Based Polymeric, Micro- and Nano-Structured Materials. *Reactive and Functional Polymers*, 2014, vol. 85, pp. 78–96. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.017>

16. Goldschmid O., Maranville L.F. Improved Spent Sulfite Liquor Determination by Nitrosolignin Method. *Analytical Chemistry*, 1959, vol. 31, iss. 3, pp. 370–374. <https://doi.org/10.1021/ac60147a012>

17. Graupner N. Application of Lignin as Natural Adhesion Promoter in Cotton Fibre-Reinforced Poly(Lactic Acid) (PLA) Composites. *Journal of Materials Science*, 2008, vol. 43, pp. 5222–5229. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2762-3>

18. Grigsby W.J., Scott S.M., Plowman-Holmes M.I., Middlewood P.G., Recabar K. Combination and Processing Keratin with Lignin as Biocomposite Materials for Additive Manufacturing Technology. *Acta Biomaterialia*, 2020, vol. 104, pp. 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.12.026>

19. Laurichesse S., Avérous L. Chemical Modification of Lignins: Towards Biobased Polymers. *Progress in Polymer Science*, 2014, vol. 39, iss. 7, pp. 1266–1290. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004>

20. Lewis H.F., Brauns F.E., Buchanan M.A., Brookbank E.B. Lignin Esters of Mono- and Dibasic Aliphatic Acids. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1943, vol. 35, iss. 10, pp. 1113–1117. <https://doi.org/10.1021/ie50406a020>

21. Li Y., Li J., Ren B., Cheng H. Conversion of Lignin to Nitrogenous Chemicals and Functional Materials. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 20, art. no. 5110. <https://doi.org/10.3390/ma17205110>

22. Llevot A., Grau E., Carlotti S., Grelier S., Cramail H. From Lignin-Derived Aromatic Compounds to Novel Biobased Polymers. *Macromolecular Rapid Communications*, 2016, vol. 37, iss. 1, pp. 9–28. <https://doi.org/10.1002/marc.201500474>

23. Naqvi M., Yan J., Dahlquist E. Black Liquor Gasification Integrated in Pulp and Paper Mills: A Critical Review. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, iss. 21, pp. 8001–8015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.013>

24. Orebom A., Verendel J.J., Samec J.S.M. High Yields of Bio Oils from Hydrothermal Processing of Thin Black Liquor without the Use of Catalysts or Capping Agents. *ACS Omega*, 2018, vol. 3, iss. 6, pp. 6757–6763. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00854>
25. Patil S.V., Argyropoulos D.S. Stable Organic Radicals in Lignin: A Review. *ChemSusChem*, 2017, vol. 10, iss. 17, pp. 3284–3303. <https://doi.org/10.1002/cssc.201700869>
26. Qian Y., Zhong X., Li Y., Qiu X. Fabrication of Uniform Lignin Colloidal Spheres for Developing Natural Broad-Spectrum Sunscreens with High Sun Protection Factor. *Industrial Crops and Products*, 2017, vol. 101, pp. 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.001>
27. Rochester J.R. Bisphenol A and Human Health: A Review of the Literature. *Reproductive Toxicology*, 2013, vol. 42, pp. 132–155. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2013.08.008>
28. Sadeghifar H., Cui C., Argyropoulos D.S. Toward Thermoplastic Lignin Polymers. Part 1. Selective Masking of Phenolic Hydroxyl Groups in Kraft Lignins via Methylation and Oxypropylation Chemistries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, vol. 51, iss. 51, pp. 16713–16720. <https://doi.org/10.1021/ie301848j>
29. Samec J., Löfstedt J., Dahlstrand C., Orebom A., Sawadjoon S. *Composition Comprising Esters of Lignin and Oil or Fatty Acids*. Patent US, no. US 10030147, 2016.
30. Sansaniwal S.K., Pal K., Rosen M.A., Tyagi S.K. Recent Advances in the Development of Biomass Gasification Technology: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 72, pp. 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>
31. Sen S., Patil S., Argyropoulos D.S. Thermal Properties of Lignin in Copolymers, Blends, and Composites: A Review. *Green Chemistry*, 2015, vol. 17, iss. 11, pp. 4862–4887. <https://doi.org/10.1039/C5GC01066G>
32. Tomani P., Axegård P., Berglin N., Lovell A., Nordgren D. Integration of Lignin Removal into a Kraft Pulp Mill and Use of Lignin as a Biofuel. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2011, vol. 45, iss. 7–8, pp. 533–540.
33. Udeni Gunathilake T.M.S., Ching Y.C., Chuah C.H. Enhancement of Curcumin Bioavailability Using Nanocellulose Reinforced Chitosan Hydrogel. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 2, art. no. 64. <https://doi.org/10.3390/polym9020064>
34. Wallmo H., Theliander H., Jönsson A.-S., Wallberg O., Lindgren K. Chemical Pulping: The Influence of Hemicelluloses during the Precipitation of Lignin in Kraft Black Liquor. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2009, vol. 24, iss. 2, pp. 165–171. <https://doi.org/10.3183/npprj-2009-24-02-p165-171>
35. Wang H., Eberhardt T.L., Wang C., Gao S., Pan H. Demethylation of Alkali Lignin with Halogen Acids and its Application to Phenolic Resins. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 11, art. no. 1771. <https://doi.org/10.3390/polym11111771>
36. Williams D.L.H. Chapter 6 – Nitrosation. *Nitrosation Reactions and the Chemistry of Nitric Oxide*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2004, pp. 105–115. <https://doi.org/10.1016/B978-044451721-0/50007-4>
37. Zinovyev G., Summers I., Korntner P., Sulaeva I., Rosenau T., Potthast A. Molar Mass-Dependent Profiles of Functional Groups and Carbohydrates in Kraft Lignin. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2017, vol. 37, iss. 3, pp. 171–183. <https://doi.org/10.1080/02773813.2016.1253103>

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 676.26

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-169-178

Барьерные и прочностные свойства мешочной бумаги с покрытием из агар-агара

Л.Р. Галеева^{1✉}, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAE-8448-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9004-4549>

А.А. Хадеева¹, аспирант; ResearcherID: [NBW-6648-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7756-3770>

С.Н. Якупов², канд. техн. наук; ResearcherID: [R-6951-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-3679>

Е.И. Байгильдеева¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [OLR-1648-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4611-4412>

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; l.musina@yandex.ru[✉], khadeeva1999@mail.ru, baigildeeva_e_i@mail.ru

²Казанский научный центр РАН, ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, Россия, 420111; tamas_86@mail.ru

Поступила в редакцию 07.05.25 / Одобрена после рецензирования 23.08.25 / Принята к печати 25.08.25

Аннотация. Получены образцы мешочной бумаги марки М78 с покрытием из агар-агара (биоразлагаемый полимер, производимый из бурых и красных водорослей) толщиной 15–70 мкм. Показано, что при нанесении на мешочную бумагу водного раствора, содержащего агар-агар, происходит формирование сплошного эластичного покрытия, причем часть полимера проникает в объем бумаги, заполняя межволоконное пространство и, возможно, макро- и микропоры самих волокон. При увеличении толщины полимерного покрытия капельная впитываемость материала растет, а затем выходит на некоторое стабильное значение (с учетом ошибки эксперимента). Выяснено, что толщина покрытия из агар-агара 40 мкм достаточна для придания барьерных свойств мешочной бумаге по отношению к действию влаги. При этом капельная впитываемость бумаги с покрытием составляет ~1000 с, а впитываемость при полном погружении – ~40 %. Для оценки механических свойств целлюлозно-бумажных материалов предложен способ определения прочностных свойств полученных образцов, подразумевающий всестороннюю деформацию образцов, позволяющий пренебречь анизотропией. Показано, что тангенциальная жесткость мешочной бумаги с покрытием из агар-агара на 15–20 % выше, чем у исходной бумаги. Разработан механизм данного упрочнения, заключающийся в следующем. При приложении нагрузки на бумажный материал его разрушение происходит за счет как разрыва целлюлозных волокон, так и отделения волокон друг от друга. В случае недостатка связующего нагрузка от волокна к волокну передается только посредством силы трения. В бумаге, поверхностный слой которой пропитан агар-агаром, нагрузка от волокна к волокну идет через полимер, поэтому деформационно-прочностные свойства повышаются. Природа целлюлозных волокон и агар-агара обуславливает проявление хорошей адгезии между ними. Сделан вывод о том, что мешочная бумага с покрытием из агар-агара экологична, т. к. оба ее компонента являются биоразлагаемыми.

Ключевые слова: мешочная бумага, агар-агар, капельная впитываемость, водопоглощение, тангенциальная жесткость, биоразлагаемость

© Галеева Л.Р., Хадеева А.А., Якупов С.Н., Байгильдеева Е.И., 2025



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

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также осуществления трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках госпрограммы «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Для цитирования: Галеева Л.Р., Хадеева А.А., Якупов С.Н., Байгильдеева Е.И. Барьерные и прочностные свойства мешочной бумаги с покрытием из агар-агара // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 169–178. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-169-178>

Original article

Barrier and Strength Properties of Agar-Agar Coated Sack Paper

Lyaysan R. Galeeva¹✉, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAE-8448-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9004-4549>

Alina A. Khadeeva¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [NBW-6648-2025](#),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7756-3770>

Samat N. Yakupov², Candidate of Engineering; ResearcherID: [R-6951-2016](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-3679>

Ekaterina I. Baygildeeva, Candidate of Engineering;
ResearcherID: [OLR-1648-2025](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9370-7544>

¹Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; l.musina@yandex.ru✉, khadeeva1999@mail.ru, baigildeeva_e_i@mail.ru

²Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, ul. Lobachevskogo, 2/31, Kazan, 420111, Russian Federation; tamas_86@mail.ru

Received on May 7, 2025 / Approved after reviewing on August 23, 2025 / Accepted on August 25, 2025

Abstract. Samples of M78 sack paper coated with agar-agar (a biodegradable polymer produced from brown and red algae) with a thickness of 15–70 μm have been obtained. It has been shown that when an aqueous solution, containing agar-agar is applied to sack paper, a continuous elastic coating is formed, with part of the polymer penetrating into the volume of the paper, filling the interfiber space and, possibly, the macro- and micropores of the fibers themselves. As the thickness of the polymer coating grows, the drip absorbency of the material increases and then reaches a certain stable value (taking into account the experimental error). It has been found that the thickness of the agar-agar coating of 40 μm is sufficient to impart barrier properties to sack paper with respect to the action of moisture. In this case, the drip absorbency of coated paper will be equal to ~ 1000 s, and the absorbency at full immersion will be ~ 40 %. To evaluate the mechanical properties of pulp and paper materials, a method is proposed for determining the strength properties of the obtained samples, implying a comprehensive deformation of the samples, allowing for anisotropy to be neglected. It has been shown that the tangential stiffness values of sack paper coated with agar-agar is 15–20 % higher than that of the original paper. A mechanism for this strengthening has been developed, which consists in the following. When a load is applied to the paper material, its destruction occurs due to both the rupture of cellulose fibers and the separation of fibers from each other. In case of a lack of binder, the load is transferred from fiber to fiber only by means of friction force. In paper, the surface layer of which is impregnated with agar-agar, the load

from fiber to fiber goes through the polymer, therefore the deformation and strength properties increase. The nature of cellulose fibers and agar-agar ensures the manifestation of good adhesion between them. It has been concluded that agar-agar coated sack paper is environmentally friendly, since both of its components are biodegradable.

Keywords: sack paper, agar-agar, drip absorbency, water absorption, tangential stiffness, biodegradability

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, as well as performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the state program “Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan”.

For citation: Galeeva L.R., Khadeeva A.A., Yakupov S.N., Baygildeeva E.I. Barrier and Strength Properties of Agar-Agar Coated Sack Paper. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 169–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-169-178>

Введение

Высокие прочностные характеристики мешочной бумаги, наряду с традиционными для целлюлозно-бумажных материалов (ЦБМ) дешевизной, доступностью сырья и удобстве при транспортировке и эксплуатации, делают ее одним из лидеров по объему выпуска и потребления. Но, как и все ЦБМ, мешочная бумага имеет существенный недостаток: снижение механической прочности при увлажнении, что приводит к порче упакованных в нее товаров и продуктов [4].

Для повышения эксплуатационных характеристик ЦБМ применяются разнообразные способы и приемы: пропитка, обработка лаками и составами (мелование), ламинирование, нанесение полимерных покрытий и др. [1, 2, 7–9].

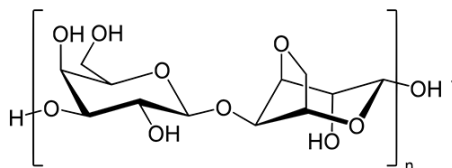
Наиболее удобным и эффективным способом увеличения стойкости бумаги и картона к действию высокой влажности и воды, а также динамических нагрузок является нанесение на их поверхность полимерных покрытий из растворов или суспензий. Однако при использовании синтетических полимеров теряется одно из преимуществ ЦБМ – экологичность и возобновляемость сырья (вторичная переработка). Поэтому проводится все больше исследований по поиску биоразлагаемых полимеров, способных служить надежными покрытиями бумаги и картона, повышающими их эксплуатационные свойства и несильно удорожающими материал. В качестве подобных покрытий пробуют использовать полилактид, крахмал, поликапролактон, альгинат натрия и др. [1, 3, 6, 11–17, 19, 20].

Одним из таких биоразлагаемых полимеров, по нашему мнению, может служить агар-агар, получаемый из бурых и красных водорослей. При нормальных условиях он является отличной защитой бумаги от действия влаги, т. к. растворяется в воде только при температуре выше 90 °С. Добавление такого полимерного покрытия на поверхность ЦБМ позволит повысить ее прочность. В данном случае сохраняется и экологичность: агар-агар допущен к контакту с пищевыми продуктами (является пищевой добавкой Е-406), это биоразлагаемый полимер и бумажная упаковка с таким покрытием перерабатывается вместе с макулатурным сырьем.

Целью данной работы является получение мешочной бумаги с покрытием из агар-агара с определением ее барьерных и прочностных свойств.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были выбраны мешочная бумага марки М-78 (ГОСТ 2228–81) с массой 1 м^2 78 г и агар-агар 900 (ГОСТ 16280–2002, страна-производитель – Вьетнам) химической формулы



Для исследования приготавливали образцы размерами 120×120 мм. Покрытие, наносимое на поверхность мешочной бумаги, представляло собой водный раствор с агар-агаром в концентрации от 1 до 5 %. Раствор готовили следующим образом. Сначала в небольшое количество воды добавляли агар-агар, кипятили в течение 3–5 мин и доводили до нужной концентрации путем добавления воды с температурой $90\text{--}95^\circ\text{C}$. Нанесение покрытия на поверхность бумаги осуществляли с помощью кисти. В производственных условиях это возможно с использованием клеильных валиков. Удаление влаги из образцов проводили выпариванием при комнатной температуре в течение не менее 24 ч.

Толщину мешочной бумаги без и с покрытием измеряли микрометром марки ТИП МК25-1 по ГОСТ Р ИСО 534–2012. Определение поверхностной впитываемости капельным способом осуществляли по ГОСТ 12603–67, впитываемости при полном погружении – по ГОСТ 13648.

Прочностные свойства образцов учитывали при помощи специальной экспериментальной установки (рис. 1) с использованием поверхностного давления. В процессе нагружения производили мониторинг формы деформирования образца и фиксировали зависимость «давление P – прогиб H_{sr} » (H_{sr} – средний прогиб), после чего вычисляли тангенциальную жесткость B для среднего изгиба [18] по классификации Х.М. Муштары [5].

Все измерения проводили не меньше чем 5 раз. Средняя ошибка экспериментов составляла не более 5 %.

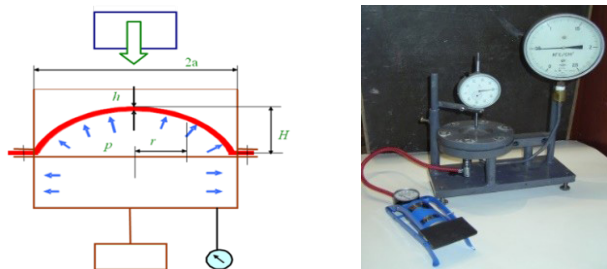


Рис. 1. Схема испытаний и изображение одного из вариантов установки определения тангенциальной жесткости ($2a$ – диаметр (2 радиуса) измерительной ячейки; h – толщина образца; P – давление воздуха; r – радиус отверстия для подачи воздуха; H – прогиб)

Fig. 1. The test scheme and image of one of the installation options for determining tangential stiffness ($2a$ – diameter (2 radii) of the measuring cell; h – sample thickness; P – air pressure; r – radius of the air supply hole; H – deflection)

Результаты исследования и их обсуждение

Первым этапом работы стал поиск оптимальной толщины покрытия из агар-агара. Толщину полимерного покрытия, наносимого на картон, можно изменять, используя водные растворы агар-агара различных концентраций. После нанесения агар-агара в форме 0,5–5,0%-х водных растворов одинакового объема, толщина покрытий ожидаемо изменилась (рис. 2).

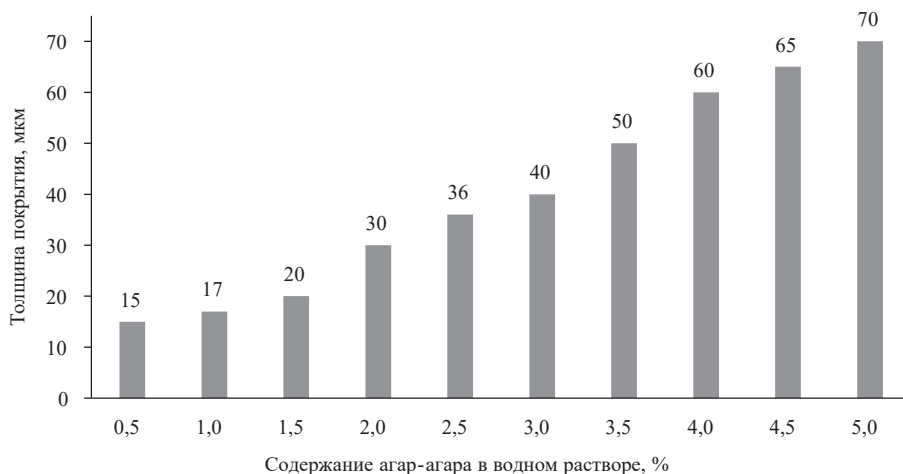


Рис. 2. Толщина покрытия из агар-агара на мешочной бумаге при использовании водных растворов полимера различных концентраций

Fig. 2. The thickness of agar-agar coating on sack paper when using aqueous polymer solutions of various concentrations

Анализ данных рис. 2 показывает, что часть полимера проникает в объем бумаги, заполняя межволоконное пространство и, возможно, макро- и микропоры самих волокон. Об этом свидетельствуют:

отсутствие увеличения толщины покрытия в 2 раза при росте концентрации полимера в растворе во столько же раз (например, при сравнении покрытий 0,5%-х и 1,0%-х или 2,0%-х и 4,0%-х водных растворов агар-агара);

нелинейный характер зависимости толщины покрытия от содержания агар-агара в водном растворе (наблюдается перегиб прямой начиная с использования 1,5%-го раствора полимера).

Одним из самых информативных методов оценки барьерных свойств целлюлозно-бумажных материалов (по отношению к воде) является капельный метод определения впитываемости. Исследование этого показателя позволило установить, что покрытие из агар-агара повышает гидрофобность мешочной бумаги. После нанесения на материал раствора агар-агара на поверхности образуется эластичное покрытие, которое препятствует проникновению воды в структуру бумаги.

Видно (рис. 3), что при использовании растворов агар-агара с концентрацией полимера до 3,0 % капельная впитываемость растет, а затем выходит на некоторое стабильное значение (с учетом ошибки эксперимента). Значит, толщина покрытия из агар-агара 40 мкм достаточна для повышения стойкости мешочной бумаги к действию влаги. К тому же было замечено, что если содержание агар-агара в водном растворе превышало 3 %, то покрытие полу-

чалось неровным, с видимыми следами от кисти. Это происходит из-за высокой вязкости растворов, которая обусловлена высокой степенью полимеризации агар-агара. Поэтому дальнейшие исследования проводили с образцами мешочной бумаги с покрытием, полученным при использовании 3,0%-го водного раствора агар-агара.

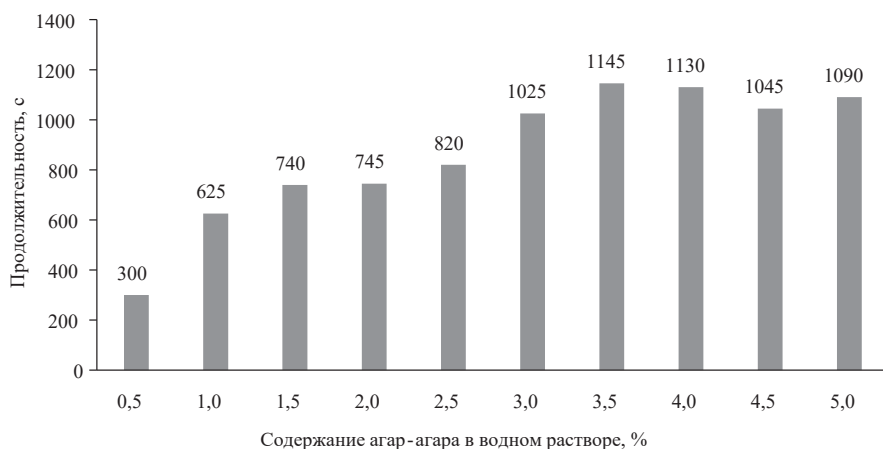


Рис. 3. Впитываемость образцов по капельному методу

Fig. 3. The absorbency of samples by the drip method

Можно заметить, что числовые значения капельной впитываемости достаточно велики, за это время вода может частично испариться, а не впитаться в структуру бумаги, что внесет погрешность в результат. Однако даже в этом случае данные эксперимента говорят о повышенной стойкости мешочной бумаги с покрытием из агар-агара к действию влаги.

Определение впитываемости при полном погружении не выявило существенных отличий для мешочной бумаги (48,0 %) и бумаги с покрытиями из агар-агара различной толщины (47,6–39,4 %), хотя и наблюдалось некоторое снижение значений. Дело в том, что полимерное покрытие выполняет защитную функцию только с одной стороны листа бумаги, хотя при этом барьерные свойства материала безусловно повышаются.

Выше было высказано предположение, что нанесение полимерного покрытия на поверхность ЦБМ позволит повысить ее прочность. Но когда речь идет об анизотропных материалах, говорить о прочности надо с большой долей ограничений – при ее определении нужно внимательно следить за тем, в каком направлении вырезается образец. Как минимум – это машинное или перпендикулярное направление. Но даже небольшое отклонение ориентации приложения нагрузки к образцам ЦБМ при установлении их прочности может дать ошибку. Полимерное покрытие в зависимости от способа его нанесения может как снижать, так и повышать степень анизотропии материалов. Поэтому нами был предложен иной способ определения прочностных свойств полученных образцов, подразумевающий всестороннюю (в 2-мерной плоскости) деформацию образцов. Экспериментально-теоретический метод [10] позволяет устанавливать интегральные механические свойства тонких материалов в 2-мерной постановке. Для этого на экспериментальном этапе из тонкослойного материала со сложной структурой вырезают круглые образцы, которые зажимаются по

контур на специальных устройствах экспериментальной установки и нагружаются поверхностным давлением.

В процессе нагружения производится мониторинг формы деформирования образцов. На рис. 4 приведены изображения 2 фрагментов испытания – в начале эксперимента и непосредственно в момент разрыва материала.

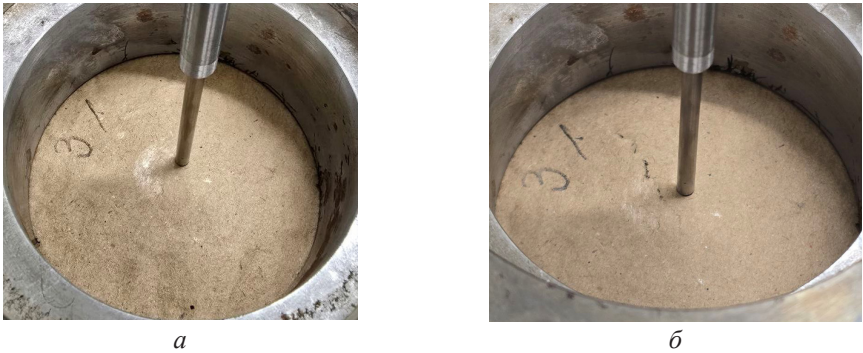


Рис. 4. Образцы мешочной бумаги с покрытием из агар-агара до нагружения (а) и в момент разрушения (б)

Fig. 4. The agar-agar coated sack paper samples before loading (a) and at the moment of destruction (b)

В результате испытаний получена зависимость «давление P – прогиб H_{sp} »; некоторые результаты приведены в таблице. Там же указана рассчитанная тангенциальная жесткость испытываемых образцов.

Зависимость «давление – прогиб» образцов мешочной бумаги с покрытием из агар-агара и без него
The “pressure – deflection” relationship for sack paper samples with and without agar-agar coating

Показатель	Значение показателя при P , кгс/см ²			
	0,022	0,032	0,042	0,052
<i>Мешочная бумага без покрытия</i>				
H_{sp} , мм	1,27	1,91	1,98	2,21
B , Н/м	343,4	176,6	166,8	137,3
<i>Мешочная бумага с покрытием</i>				
H_{sp} , мм	1,56	2,23	2,45	2,76
B , Н/м	422,0	206,0	206,0	176,6

Видно, что тангенциальная жесткость мешочной бумаги с полимерным покрытием в среднем на 15–20 % выше, чем для исходной бумаги. Это ожидаемо, т. к. покрытие играет упрочняющую роль. Механизм данного упрочнения представляется следующим. При приложении нагрузки на бумажный материал его разрушение происходит за счет как разрыва целлюлозных волокон, так и отделения волокон друг от друга. При недостатке связующего нагрузка от волокна к волокну передается только через силу трения. В бумаге, поверхностный слой которой пропитан агар-агаром, нагрузка от волокна к волокну идет сквозь полимер, поэтому деформационно-прочностные свойства повышаются. Для реализации описанного механизма необходима высокая адгезия между волок-

ном и связующим. Природа целлюлозных волокон и агар-агара обуславливает проявление хорошей адгезии между ними как по молекулярной (адсорбционной) теории адгезии (высокое содержание полярных групп в составе обоих компонентов), так и по теории адгезии, основанной на рассмотрении разрушения (развитая поверхность волокон с большим количеством пор).

Встает вопрос об ассимиляции исследуемых материалов микроорганизмами почвы. Выше отмечалось, что бумага, покрытая агар-агаром, намного экологичнее, чем бумага с пластиковым покрытием, т. к. оба компонента биоразлагаемы. Можно предположить, что биоразложение бумаги с покрытием из агар-агара пройдет через этапы гидролиза и ассимиляции, а скорость процесса будет зависеть от условий окружающей среды (температура, влажность, наличие микроорганизмов). Агар-агар как полисахарид сравнительно легко разлагается бактериями и грибами. Микроорганизмы выделяют ферменты (агаразы), которые расщепляют полисахарид на более простые сахара. Разложение целлюлозы также происходит под действием микроорганизмов, выделяющих ферменты (целлюлазы). Затем микроорганизмы поглощают эти сахара и используют их в качестве источника энергии и углерода для роста и размножения. Причем быстрое разложение агар-агара может создать благоприятные условия (влажность, доступность питательных веществ) для разложения бумаги. Агар-агар в этом случае – источник питательных веществ для микроорганизмов, разлагающих целлюлозу. Хотя не исключено, что на начальном этапе покрытие из агар-агара будет частично защищать бумагу от воздействия окружающей среды (например, от высыхания), замедляя ее распад. Однако это предположение нуждается в практическом подтверждении.

Выводы

1. Получена мешочная бумага с покрытием из агар-агара. Показано, что при нанесении на мешочную бумагу водного раствора агар-агара происходит формирование на ней сплошного эластичного покрытия, причем часть агар-агара проникает в объем бумаги, заполняя межволоконное пространство и, возможно, макро- и микропоры волокон.

2. Покрытие из агар-агара повышает гидрофобность мешочной бумаги. Толщина покрытия из агар-агара 40 мкм достаточна для улучшения барьерных свойств мешочной бумаги по отношению к действию влаги. При этом капельная впитываемость бумаги с покрытием составляет ~1000 с, а впитываемость при полном погружении – ~40 %.

3. Тангенциальная жесткость мешочной бумаги с покрытием из агар-агара, определенная при всесторонней деформации образцов, на 15–20 % выше, чем для исходной бумаги. Это происходит за счет передачи нагрузки от волокна к волокну через полимер.

4. Мешочная бумага с покрытием из агар-агара экологична, т. к. оба ее компонента являются биоразлагаемыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Басырова С.И., Галиханов М.Ф., Галеева Л.Р. Поверхностные свойства модифицированного картона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 233–240.

Basirova S.I., Galikhanov M.F., Galeeva L.R. Surface Properties of Modified Cardboard. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 6, pp. 233–240. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.233>

2. Ешбаева У.Ж., Исмаилова Г.И., Нишонов А.М., Абдуалимова Л.З. Свойства бумаги, содержащей проклеивающее вещество полиакриламида // *Universum: технические науки: электрон. науч. журн.* 2021. № 7(88). Ч. 2. С. 30–33.

Eshbaeva U.Zh., Ismailova G.I., Nishonov A.M., Abdualimova L.Z. Characteristic of the Paper, Containing Waste Poliakrilamid. *Universum: tekhnicheskie nauki: Electronic Scientific Journal*, 2021, no. 7(88), part 2, pp. 30–33. (In Russ.).

3. Захаров И.В., Захарова Н.Л., Канарский А.В., Окулова Е.О., Казаков Я.В., Дулькин Д.А. Физико-механические свойства картона, обработанного биомодифицированным глютенном // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2017. № 6. С. 135–144.

Zakharov I.V., Zakharova N.L., Kanarskiy A.V., Okulova E.O., Kazakov Ya.V., Dul'kin D.A. Physical and Mechanical Properties of Cardboard Processed by Biomodified Gluten. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 6, pp. 135–144. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.135>

4. Иванов С.Н. Технология бумаги: учебное пособие. 4-е изд. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 696 с.

Ivanov S.N. *Paper Technology*: Textbook. 4th ed. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 696 p. (In Russ.).

5. Муштари Х.М., Галимов К.З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань: Таткнигоиздат, 1957. 431 с.

Mushtari Kh.M., Galimov K.Z. *Nonlinear Theory of Elastic Shells*. Kazan, Tatknigoizdat Publ., 1957. 431 p. (In Russ.).

6. Назмиева А.И., Галиханов М.Ф., Мусина Л.Р., Нафикова А.Р., Альметова Г.Ф. Влияние пшеничного нативного крахмала и действия коронного разряда на свойства мешочной бумаги // *Вестн. Казанск. технол. ун-та*. 2015. Т. 18, № 16. С. 151–153.

Nazmieva A.I., Galikhanov M.F., Musina L.R., Nafikova A.R., Almetova G.F. The Influence of Wheat Native Starch and Corona Discharge on the Properties of Sack Paper. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2015, vol. 18, no. 16, pp. 151–153. (In Russ.).

7. Патент RU 2805748 C2. Композиция для создания защитного слоя на поверхности бумаги: № 2021132383: заявл. 08.11.2021: опубл. 23.10.2023. Бюл. № 30 / В.В. Ригин.

Rigin V.V. *Composition for Creating a Protective Layer on the Surface of Paper*. Patent RU 2805748 C2, 2023. (In Russ.).

8. Тимошенко А.Б., Никандров А.Б. Эффективные химикаты для удержания и обезвоживания бумажной массы при производстве картона из макулатурного сырья // *Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ЦБП. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД*, 2021. Т. II. С. 71–76.

Timoshenko A.B., Nikandrov A.B. Effective Chemicals for Retention and Dehydration of the Pulp in the Production of Cardboard from Waste Paper. *Sovremennaya tsellulozno-bumazhnaya promyshlennost'. Aktual'nye zadachi i perspektivnye resheniya* = Modern Pulp and Paper Industry. Current Challenges and Promising Solutions: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Pulp and Paper Specialists. St. Petersburg, Higher School of Technology and Energy of the Saint Petersburg Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 2021, vol. II, pp. 71–76. (In Russ.).

9. Филатов Н.М., Уваров Б.А., Апанович Н.А. Полиэфирные лаки и эмали для защиты тары. М.: ПХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 232 с.

Filatov N.M., Uvarov B.A., Apanovich N.A. *Polyester Varnishes and Enamels for Container Protection*. Moscow, Mendeleev University of Chemical Technology, 2015. 232 p. (In Russ.).

10. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Якупов С.Н. Методика исследования неплоских пленок и мембран сложной структуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 2. С. 55–59.

Yakupov N.M., Galimov N.K., Yakupov S.N. Methodology of Studying Non-Planar Films and Membranes of Complex Structure. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* = Industrial Laboratory Diagnostics of Materials, 2019, vol. 85, no. 2, pp. 55–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59>

11. Basyrova S.I., Galikhanov M.F., Shaymukhametova I.F., Bogdanova S.A. The Influence of the Unipolar Corona Discharge on Surface Energy of Modified Cardboard. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2174, iss. 1, art. no. 020203. <https://doi.org/10.1063/1.5134354>

12. Galikhanov M.F., Galeeva L.R., Nazmieva A.I. Strengthening of Paper Materials under the Action of Unipolar Corona Discharge by Increasing the Level of Interaction between Cellulose Fibers. *Fibre Chemistry*, 2020, vol. 51, pp. 387–391. <https://doi.org/10.1007/s10692-020-10117-6>

13. Kanie O., Ishikawa H., Ohta S., Kitaoka T., Tanaka H. Study on Characteristics of Paper Laminated with Biodegradable Plastics, 1. Burial Test in Soil. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 2002, vol. 47, no. 1, pp. 89–96. <https://doi.org/10.5109/24463>

14. Kanie O., Tanaka H., Mayumi A., Kitaoka T., Wariishi H. Composite Sheets with Biodegradable Polymers and Paper, the Effect of Paper Strengthening Agents on Strength Enhancement, and an Evaluation of Biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, vol. 96, iss. 3, pp. 861–866. <https://doi.org/10.1002/app.21523>

15. Rastogi V.K., Samyn P. Bio-Based Coatings for Paper Applications. *Coatings*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 887–930. <https://doi.org/10.3390/coatings5040887>

16. Tanpichai S., Srimarut Y., Woraprayote W., Malila Y. Chitosan Coating for the Preparation of Multilayer Coated Paper for Food-Contact Packaging: Wettability, Mechanical Properties, and Overall Migration. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, vol. 213, pp. 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.193>

17. Wang Y., Zhang X., Kan L., Shen F., Ling H., Wang X. All-Biomass-Based Eco-Friendly Waterproof Coating for Paper-Based Green Packaging. *Green Chemistry*, 2022, iss. 24, pp. 7039–7048. <https://doi.org/10.1039/D2GC02265F>

18. Yakupov S.N. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-Walled Elements. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2019, vol. 40, pp. 834–839. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060258>

19. Zhang S., Sun P., Lin X., Wang H., Huang X., Liu H., Xu X. Strong, High Barrier, Water- and Oil-Resistant Cellulose Paper-Based Packaging Material Enabled by Polyvinyl Alcohol-Bentonite Coordination Interactions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, vol. 285, art. no. 138076. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138076>

20. Zhu R., He Z., Sun C., Jin S., Ma R., Zhang D., Long Z. Fabrication of Recyclable High-Barrier Water- and Oil-Proof Paper by Sodium Alginate/Cellulose Nanofiber/Ethyl Cellulose/Polyvinyl Butyral. *Industrial Crops and Products*, 2023, vol. 203, art. no. 117084. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117084>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 630.81:536.662

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-179-188

Теплотворная способность деструктурированной стволовой древесины ели *Picea abies* (L.)

О.Н. Тюкавина¹✉, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

С.А. Васькин², канд. с.-х. наук, вед. инженер; ResearcherID: [AHB-7358-2022](https://orcid.org/0000-0001-6160-5140),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6160-5140>

Д.Ю. Корепин², инженер; ResearcherID: [KYR-2226-2024](https://orcid.org/0009-0003-0063-3879),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0063-3879>

П.А. Феклистов³, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

В.И. Мелехов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

С.С. Макаров⁴, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru✉, v.melekhov@narfu.ru

²Филиал ФБУ «Рослесозащита» – «Центр защиты леса Архангельской области», ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; serzh.vaskin.2015@mail.ru, korepin.mitya@yandex.ru

³Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; pfeklistov@yandex.ru

⁴Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; s.makarov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 13.09.24 / Одобрена после рецензирования 08.12.24 / Принята к печати 11.12.24

Аннотация. Популярность биоэнергетики в свете развития зеленой экономики и стремления к достижению углеродной нейтральности производств возрастает. В связи с этим рассматриваются различные виды энергетического сырья, его свойства и возможности утилизации отходов. Цель исследования заключается в оценке теплотворной способности древесины ели, поврежденной дереворазрушающими грибами. Для измерения теплотворной способности стволовой древесины ели применяли автоматизированный бомбовый калориметр АБК-1В. Отдельно из древесины, коры и сучков прессовали пеллеты, высушивали их в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Пеллеты сжигали в абсолютно сухом состоянии. Массу золы определяли как разницу между массой тигеля с остатками после сжигания образца в калориметрической бомбе и массой пустого тигеля. Теплотворная способность здоровой древесины ели составляет 20 180–20 232 Дж/г.

В поперечном сечении ствола ели теплотворная способность изменяется в диапазоне от 18 900 до 21 700 Дж/г. Наименьшие значения характерны для предраневой зоны деструктированной древесины. Древесина, поврежденная коррозионной гнилью, отличается меньшей теплоемкостью по сравнению со здоровой на 1,5–6,2 % (18 926–19 868 Дж/г). Теплотворная способность древесины, поврежденной деструктивной гнилью, превышает показатель для здоровой древесины на 1,5–10,5 % (20 487–22 301 Дж/г). С увеличением стадии деструктивной гнили древесины ели ее теплотворная способность возрастает. Теплотворную способность pellets из деструктированной древесины ели можно оценить по их внешнему виду. Желтая и пестрая окраска прессованного сырья указывают на значимо меньшую теплотворную способность по сравнению с pellets-ами бурого и оранжевого цветов. Зольность деструктированной древесины разных типов находится на одном уровне. Зольность древесины, поврежденной коррозионной гнилью 3-й стадии, значимо больше, чем у здоровой древесины и древесины предшествующих стадий разложения на 96–129 %. У коры поврежденных гнилью стволов ели теплотворная способность находится на уровне теплотворной способности здоровой древесины, а зольность выше в 3 раза. У сучка теплотворная способность больше показателя здоровой древесины на 7 %, а зольность остается на одном уровне.

Ключевые слова: теплотворная способность, ель, древесина, ствол, коррозионная гниль, деструктивная гниль

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёва УрО РАН (№ госрегистрации 125021902596-8).

Для цитирования: Тюкавина О.Н., Васькин С.А., Корепин Д.Ю., Феклистов П.А., Мелехов В.И., Макаров С.С. Теплотворная способность деструктированной стволовой древесины ели *Picea abies* (L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 179–188. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-179-188>

Original article

Calorific Value of the Degraded Stem Wood of Spruce *Picea abies* (L.)

Olga N. Tyukavina¹✉, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Sergey A. Vaskin², Candidate of Agriculture, Leading Engineer; ResearcherID: [AHB-7358-2022](https://orcid.org/0000-0001-6160-5140), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6160-5140>

Dmitriy Yu. Korepin², Engineer; ResearcherID: [KYR-2226-2024](https://orcid.org/0009-0003-0063-3879), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0063-3879>

Pavel A. Feklistov³, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Vladimir I. Melekhov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

Sergey S. Makarov⁴, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

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

²Federal Forestry Agency – the Federal Budgetary Institution “Russian Center of Forest Health”, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; serzh.vaskin.2015@mail.ru, korepin.mitya@yandex.ru



³N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Nikolskiy, 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru

⁴Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; s.makarov@rgau-msha.ru

Received on September 13, 2024 / Approved after reviewing on December 8, 2024 / Accepted on December 11, 2024

Abstract. The popularity of bioenergy is increasing in the light of the development of the green economy and the desire to achieve carbon neutrality in production. In this regard, various types of energy raw materials, their properties and waste disposal possibilities are being considered. The purpose of the study has been to assess the calorific value of spruce wood damaged by wood-destroying fungi. An automated ABK-1B bomb calorimeter has been used to measure the calorific value of spruce stem wood. Separately, pellets have been pressed from wood, bark and knots and dried in a drying cabinet at a temperature of 105 °C. The pellets have been burned in a completely dry state. The ash weight has been determined as the difference between the weight of the crucible with residues after combustion of the sample in a calorimeter bomb and the weight of the empty crucible. The calorific value of healthy spruce wood is 20,180–20,232 J/g. In the cross section of the spruce stem, the calorific value varies in the range from 18,900 to 21,700 J/g. The lowest values are typical for the pre-edge zone of the degraded wood. Wood damaged by corrosive rot has a lower heat capacity compared to healthy wood by 1.5–6.2 % (18,926–19,868 J/g). The calorific value of wood damaged by destructive rot exceeds that of healthy wood by 1.5–10.5 % (20,487–22,301 J/g). As the stage of destructive rot of spruce wood increases, its calorific value grows. The calorific value of pellets from degraded spruce wood can be estimated by their appearance. The yellow and mottled colors of the pressed raw material indicate a significantly lower calorific value compared to pellets of brown and orange colors. The ash content of degraded wood of different types is at the same level. The ash content of wood damaged by stage 3 corrosive rot is significantly higher than that of healthy wood and wood at previous stages of decomposition by 96–129 %. The calorific value of the bark of spruce stems damaged by rot is at the level of the calorific value of healthy wood, and the ash content is 3 times higher. The calorific value of a knot is 7 % higher than that of healthy wood, while the ash content remains at the same level.

Keywords: calorific value, spruce, wood, stem, corrosive rot, destructive rot

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration no. 125021902596-8).

For citation: Tyukavina O.N., Vaskin S.A., Korepin D.Yu., Melekhov V.I., Feklistov P.A., Makarov S.S. Calorific Value of the Degraded Stem Wood of Spruce *Picea abies* (L.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 179–188. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-179-188>

Введение

В целях достижения глобальных стратегических целей охраны окружающей среды в области снижения выбросов углерода изучаются различные виды сырья и методы при изготовлении пеллет, их качество и возможность утилизации отходов [15–17, 19, 20]. В этом направлении разрабатываются экологически устойчивые подходы к управлению лесными экосистемами как

важнейшими источниками биоэнергии [18]. Интенсивность переработки древесного сырья и второстепенных лесных ресурсов является показателем экономической эффективности и устойчивости лесопромышленного комплекса. В рамках зеленой экономики и направления производств к углеродной нейтральности возникает необходимость преобразования древесной биомассы, нерентабельной низкосортной неликвидной древесины в экологически чистый источник энергии, например, в пеллеты или брикеты. Это позволит своевременно проводить уход за молодняками, разрабатывать гари и горельники, ветровалы.

На 2024 г. в лесном фонде Архангельской области зафиксировано 42,1 тыс. га ослабленных и погибших насаждений [1]. Площади горельников и гарей в засушливый сезон могут достигать до 80 тыс. га [11]. Усыхающие и усохшие леса, неразработанные горельники и гари пожароопасны, являются источниками распространения патогенных организмов. Ослабленные по разным причинам деревья, особенно ель, повреждаются насекомыми, поражаются дереворазрушающими грибами [4, 9]. К распространенным видам биотрофных грибов на ели относятся еловая губка, гетеробазидион мелкопоровый, еловый комлевой трутовик, климакоцистис северный, трутовик Швейница, виды рода опенок, реже отмечается корневая губка [10]. Установлено, что в северотаежных ельниках Архангельской области встречаемость корневой губки составляет 27 %, еловой губки – 48 %, трутовика Швейница – 23 % [2]. Пеструю коррозионную гниль вызывают корневая губка и еловая губка; деструктивную трещиноватую гниль – трутовик Швейница и окаймленный трутовик [2]. Дровяная древесина часто теряет свои полезные свойства в результате грибных заболеваний [25]. В связи с этим возникает необходимость оценить качество деструктированной древесины как сырья для биоэнергетики.

Цель исследования – изучение теплотворной способности древесины ели, поврежденной дереворазрушающими грибами.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено в северо-таежном лесном районе, Архангельском, Березняковском и Плесецком лесничествах. Объект исследования – стволовая древесина ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.), пораженная дереворазрушающими грибами. Образцы древесины (21 шт.) отбирали с пней на вырубке, сухостоя, ветровальных и растущих деревьев независимо от их возраста и диаметра ствола. Выбирали 3 дерева, стволы которых поражены еловой губкой (*Phellinus chrysoloma* (Fr.) Donk) с большой площадью деструкции (65–75 %) и средним диаметром 28 см. Спил брали в поперечном сечении в средней части ствола.

Оценку теплотворной способности проводили в 3-кратной повторности [13] с применением автоматизированного бомбового калориметра АБК-1В. Из древесины, коры, сучков по отдельности прессовали пеллеты, высушивали их в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Пеллеты сжигали в абсолютно сухом состоянии. Массу золы определяли как разницу между массой тигеля с остатками после сжигания образца в калориметрической бомбе и массой пустого тигеля.

Результаты исследования и их обсуждение

Теплотворная способность здоровой древесины ели составляет около 20 200 Дж/г. Развитие пестрой ядровой гнили 2-й стадии, вызванной еловой губкой (*Porodaedalea chrysoloma* (Fr.) Fiasson et Niemelä), приводит к снижению теплотворной способности стволовой древесины по сравнению со здоровой древесиной на 2,8–6,4 % ($t = 4,4\text{--}10,0$ при $t_{st} = 3,2$ и $p = 0,99$) (табл. 1). В поперечном сечении ствола деструктированная древесина различается по теплотворной способности. Наименьший показатель отмечается вблизи раневого кольца. Отличие от соседних зон составляет 2,8–3,7 % – ниже по сравнению с соседней деструктированной зоной ($t = 4,6\text{--}5,3$ при $t_{st} = 3,2$ и $p = 0,99$). Данная зона характеризуется меньшим количеством светлых ячеек в пестрой ячеистой гнили. Ее пониженная теплотворная способность может быть обусловлена активностью мицелия дереворазрушающего гриба. Согласно В. Рипачек [7], О.Н. Тюкавиной, Ф.А. Кунникову, А.Е. Кошелевой [14], зона активного роста мицелия характеризуется повышенным содержанием азота, что способствует снижению теплотворной способности [22].

Таблица 1

**Характеристика поперечного сечения ствола ели
с ядровой коррозионной гнилью 2-й стадии**

The characteristics of the cross-section of a spruce stem with stage 2 heartwood rot

Показатель	Зона деструкции ствола				Здоровая древесина	Кора	Сучок
	центральная часть	средняя часть	предраневая зона	раневое кольцо			
Теплотворная способность, Дж/г	19 116±34	19 468±44	18 923±93	19 649±126	20 232±37	20 268±58	21 731±39
Зольность, %	0,44±0,11	0,56±0,13	1,42±0,35	1,39±0,20	0,63±0,18	1,94±0,15	0,63±0,02

Наибольшей теплотворной способностью характеризуется сучок – $21\,731 \pm 39$ Дж/г. Теплотворная способность коры находится на уровне здоровой древесины. Как правило, кора обладает более высокой теплотворной способностью по сравнению с древесиной за счет повышенного содержания смолы, лигнина, экстрактивных веществ [6, 12, 24]. Однако в процессе хранения содержание древесных смол уменьшается и кора наиболее подвержена деструкции, поэтому теплотворная способность этой части дерева обусловлена сроком хранения [3, 5].

При оценке качества сырья для биоэнергетики учитывают не только теплотворную способность, но и зольность. Зольность топливного ресурса обуславливает его теплотворную способность и влияет на эффективность работы оборудования [21]. При этом закономерности изменения теплотворной способности и зольности определяются видом фракции и расположением ее в дереве, различаясь между собой [26]. Для коры характерна повышенная зольность – больше показателя для древесины в 3 раза. Зольность древесины в основном изменяется от 0,44 до 0,63 %. Однако отмечают рост зольности в раневом кольце древесины и предраневой зоне. Превышение значения деструктированной древесины составляет 2,5–3 раза ($t = 2,7\text{--}3,2$ при $t_{st} = 2,2$ и $p = 0,95$), здоровой древесины – 2,2 раза ($t = 2,4$ при $t_{st} = 2,2$ и $p = 0,95$).

Древесина, поврежденная коррозионной гнилью, характеризуется меньшей теплоемкостью по сравнению со здоровой на 1,5–6,2 % ($t = 2,2\text{--}7,9$ при

$t_{st} = 2,1$ и $p = 0,95$) (табл. 2). Наибольшее различие отмечается для 2-й стадии гнили древесины. Теплотворная способность древесины с деструктивной гнилью превышает показатель для здоровой древесины на 1,5–10,5 % ($t = 2,3$ –15,2 при $t_{st} = 2,1$ и $p = 0,95$). Самое значительное различие зафиксировано при 3-й стадии гнили древесины. Следовательно, с увеличением стадии деструктивной гнили древесины ее теплотворная способность возрастает. На сокращение теплотворной способности древесины при коррозионной гнили и возрастание при деструктивной гнили по сравнению со здоровой древесиной указывали авторы [17, 25]. Это явление обусловлено изменением содержания лигнина на единицу массы деструктированной древесины. В первом случае оно сокращается, а во втором – увеличивается. С повышением содержания лигнина теплотворная способность древесины возрастает [8, 23].

Таблица 2

Характеристика древесины ели разного типа деструкции
The characteristics of spruce wood of different types of destruction

Показатель	Здоровая древесина	Стадии гнили					
		коррозионной			деструктивной		
		1	2	3	1	2	3
Теплотворная способность, Дж/г	20 180±108	19 868±87	18 926±115	19 758±133	20 487±80	21 330±128	22 301±88
Зольность, %	0,55±0,08	0,46±0,02	0,48±0,03	0,48±0,03	0,46±0,01	0,50±0,04	0,58±0,05

Дисперсионный анализ подтверждает влияние типа и стадии гнили на теплотворную способность древесины. Влияние стадии коррозионной гнили на теплотворную способность древесины значимое высокое, стадии деструктивной гнили – значимое очень высокое (табл. 3).

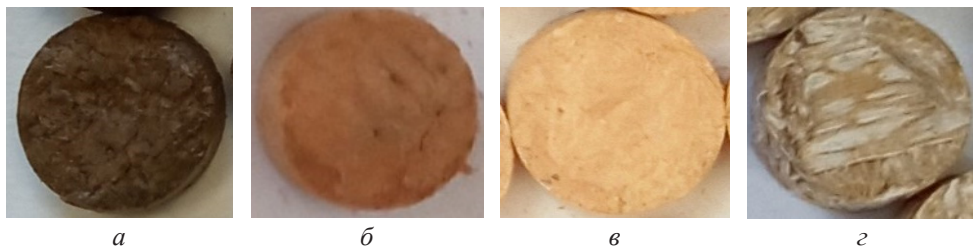
Таблица 3

Влияние типа и стадии гнили древесины ели, окраски пеллет на их теплотворную способность
The influence of the type and stage of spruce wood rot and the color of pellets on their calorific value

Дисперсия	Значение дисперсии	Число степеней свободы	Варианса	Критерий Фишера		Влияние фактора с ошибкой
				фактический	стандартный при 5%-м уровне значимости	
Коррозионная гниль						
Факториальная	10 336 495	3	3 445 498,4	17,3	2,8	0,55±0,03
Случайная	8 384 835	42	199 638,9			
Общая	18 721 331	46	—			
Деструктивная гниль						
Факториальная	22 158 929	3	7 386 309,5	63,3	3,0	0,86±0,01
Случайная	3 614 743	31	116 604,6			
Общая	25 773 672	35	—			
Окраска пеллет						
Факториальная	53 682 441	3	17 894 147,1	33,4	2,8	0,71±0,02
Случайная	21 463 635	40	536 590,9			
Общая	75 146 077	44	—			

Во всех случаях отмечается тенденция увеличения зольности древесины с возрастанием стадии деструкции. Зольность древесины, поврежденной коррозийной гнилью 3-й стадии, значительно отличается от здоровой и от предшествующих стадий гниения на 96–129 % ($t = 3,5\text{--}4,6$ при $t_{st} = 2,8\text{--}2,9$ и $p = 0,99$).

Теплотворную способность спрессованного сырья можно оценить по внешнему виду. Чем темнее окраска пеллет из деструктированной древесины, тем выше их теплотворная способность (см. рисунок). Значимого различия в теплотворной способности деструктированной древесины бурого и оранжевого цветов не отмечается. Между пеллетами из древесины желтого и оранжевого цветов различие в теплотворной способности составляет 8,2 % ($t = 5,2$ при $t_{st} = 2,8$ и $p = 0,99$). Наименьшей теплотворной способностью характеризуются пеллеты из древесины, поврежденной пестрой ямчатой коррозийной гнилью. Различие в теплотворной способности между пеллетами желтого и пестрого цветов составляет 5,7 % ($t = 3,7$ при $t_{st} = 2,8$ и $p = 0,99$). Влияние цвета пеллет из деструктированной древесины ели на их теплотворную способность по результатам дисперсионного анализа характеризуется как значимое высокое.



Влияние цвета пеллет из деструктированной древесины ели на их теплотворную способность, Дж/г: *а* – бурый, 21 555±250; *б* – оранжевый, 21 889±200; *в* – желтый, 20 222±247; *г* – пестрый, 19 127±162

The effect of the color of pellets from degraded spruce wood on their calorific value, J/g:
a – brown, 21555±250; *б* – orange, 21889±200; *в* – yellow, 20222±247;
г – mottled, 19127±162

Деструктированная древесина ели независимо от типа и стадии гнили является хорошим энергетическим материалом, т. к. ее средняя теплотворная способность превышает или равна 19 000 Дж/г [16].

Заключение

Теплотворная способность здоровой древесины ели составляет 20 180–20 232 Дж/г. В поперечном сечении ствола ели показатель изменяется в диапазоне от 18 900 до 21 700 Дж/г. Наименьшие значения характерны для предраневой зоны деструктированной древесины. У коры поврежденных гнилью стволов ели теплотворная способность находится на уровне теплотворной способности здоровой древесины, а зольность выше в 3 раза. Теплотворная способность сучка превышает показатель здоровой древесины на 7 %, а зольность остается на одном уровне. Древесина, поврежденная коррозийной гнилью, характеризуется меньшей на 1,5–6,2 % теплоемкостью по сравнению со здоровой. Теплотворная способность древесины с деструктивной гнилью превышает показатель для здоровой древесины на 1,5–10,5 %. С увеличением стадии деструктивной гнили теплотворная способность древесины возрастает. Теплотворную способ-

ность пеллет из деструктированной древесины ели можно оценить по внешнему виду. Желтая и пестрая окраска прессованного сырья указывают на значительно меньшую теплотворную способность по сравнению с пеллетами бурого и оранжевого цветов. Деструктированная древесина ели независимо от типа и стадии гнили – это хороший энергетический материал, с теплотворной способностью 19 000 Дж/г или больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доклад. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2023 год / отв. ред. Э.В. Шашин. Архангельск: 2024. 505 с.
Report: Environmental Status and Protection in the Arkhangelsk Region in 2023. Ed. by E.V. Shashin. Arkhangelsk, 2024. 505 p. (In Russ.).
2. Коптев С.В. Фаутиность северотаежных ельников // Изв. вузов. Лесн. журн. 1992. № 2. С. 20–26.
Koptev S.V. Fautiness of North Taiga Spruce Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1992, no. 2, pp. 20–26. (In Russ.).
3. Кулак М.И., Федоренчик А.С., Леонов Е.А. Прогнозирование хранения запасов топлива в условиях лесоэнергетических терминалов // Наука и инновации. 2012. № 7(113). С. 69–72.
Kulak M.I., Fedorenchik A.S., Leonov E.A. Forecasting the Storage of Fuel Reserves in Forest Energy Terminals. *Nauka i innovatsii* = Science and Innovations, 2012, no. 7(113), pp. 69–72. (In Russ.).
4. Лебедев А.В., Иванова Э.А. Патология ели в древостоях разного состава // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 3. С. 47–50.
Lebedev A.V., Ivanova E.A. Spruce Pathology in the Stands of Different Composition. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2001, no. 3, pp. 47–50. (In Russ.).
5. Леонов Е.А., Клоков Д.В., Гарабазхиу А.А., Духовник А.А. Влияние сроков хранения древесного сырья и топливной щепы на их теплотворную способность // Тр. БГТУ. 2020. Сер. 1, № 2. С. 186–191.
Leonov E.A., Klokov D.V., Garabazhiu A.A., Dukhovnik A.A. Influence of the Wood Raw Materials and Fuel Chips Storage Terms on Their Heating Ability. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2020, series 1, no. 2, pp. 186–191. (In Russ.).
6. Остроухова Л.А., Федорова Т.Е., Онучина Н.А., Левчук А.А., Бабкин В.А. Определение количественного содержания экстрактивных веществ из древесины, корней и коры деревьев хвойных видов сибиря: лиственницы (*Larix sibirica* L.), сосны (*Pinus sylvestris* L.), пихты (*Abies sibirica* L.), ели (*Picea obovata* L.) и кедра (*Pinus sibirica* Du Tour.) // Химия растит. сырья. 2018. № 4. С. 185–195.
Ostroukhova L.A., Fedorova T.E., Onuchina N.A., Levchuk A.A., Babkin V.A. Determination of the Quantitative Content of Extractives from Wood, Roots and Bark of Coniferous Trees in Siberia: Larch (*Larix sibirica* L.), Pines (*Pinus sylvestris* L.), Fir (*Abies sibirica* L.), Spruce (*Picea obovata* L.) and Cedar (*Pinus sibirica* Du Tour.). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 4, pp. 185–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018044245>
7. Рипачек В. Биология дереворазрушающих грибов. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 276 с.
Ripachek V. *Biology of Wood-Destroying Fungi*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 276 p. (In Russ.).
8. Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Тхань Б.Д., Асеева Р.М. Тепловыделение при горении древесины // Лесн. вестн. 2003. № 5. С. 74–79.
Serkov B.B., Sivenkov A.B., Than' B.D., Aseeva R.M. Heat Release during Wood Combustion. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2003, no. 5, pp. 74–79. (In Russ.).
9. Стороженко В.Г. Состояние и пораженность дереворазрушающими грибами коренных ельников подзоны северной тайги // Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 6. С. 153–158.

Storozhenko V.G. The Condition and Scope of Damage by Wood-Attacking Fungi in North Taiga Pristine Spruce Forests. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2013, no. 6, pp. 153–158. (In Russ.).

10. Стороженко В.Г., Засадная В.А. Структура древесного отпада девственных ельников северной и южной тайги Европейской части России // Сиб. лесн. журн. 2019. № 2. С. 64–73.

Storozhenko V.G., Zasadnaya V.A. Structure of Woody Debris of Virgin Spruce Forests of the Northern and Southern Taiga in the European Part of Russia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal Forest Science, 2019, no. 2, pp. 64–73. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15372/SJFS20190206>

11. Тюкавина О.Н. Направления использования сосновых горельников // Лесная наука современности: материалы VI Мелеховских науч. чтений, посвящ. 115-летию со дня рождения выдающегося ученого-лесоведа, акад. Ивана Степановича Мелехова. Архангельск: САФУ, 2020. С. 62–69.

Tyukavina O.N. Directions for the Use of Pine Burnt Wood. *Modern Forest Science: Proceedings of the VI Melekhov Scientific Readings Dedicated to the 115th Anniversary of the Birth of the Outstanding Scientist-Forester, Academician Ivan Stepanovich Melekhov*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2020, pp. 62–69. (In Russ.).

12. Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Мелехов В.И., Неверов Н.А. Теплотворная способность фракций надземной фитомассы культур сосны обыкновенной в условиях Северо-таежного лесного района // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 2. С. 27–33.

Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Melekhov V.I., Neverov N.A. Calorific Value of Aerial Phytomass Fractions of Scots Pine in North Taiga Forest Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 27–33. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-2-27-33>

13. Тюкавина О.Н., Корепин Д.Ю. Теплотворная способность стволов ели при поражении их еловой губкой // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. С. 210–212.

Tyukavina O.N., Korepin D.Yu. Calorific Value of Spruce Trunks when They are Affected by a Spruce Sponge. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg, St. Petersburg State Forestry University Publ., 2024, pp. 210–212. (In Russ.).

14. Тюкавина О.Н., Кунников Ф.А., Кошелева А.Е. Влияние гнили на распределение минеральных элементов в древесине тополя бальзамического // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2016. № 214. С. 105–119.

Tyukavina O.N., Kunnikov F.A., Kosheleva A.E. The Influence of Rot on the Distribution of Mineral Elements in Balsam Poplar Wood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2016, no. 214, pp. 105–119. (In Russ.).

15. Apraku S.E., Shen Y. Biomass Pellet Fuel Production and Utilization in Ghana: A Review. *ACS Sustainable Resource Management*, 2024, vol. 1, iss. 4, pp. 586–603.

<https://doi.org/10.1021/acssusresmgmt.3c00121>

16. Gendek A., Aniszewska M., Owoc D., Tamelová B., Malat'ák J., Velebil J., Krilek J. Physico-Mechanical and Energy Properties of Pellets Made from Ground Walnut Shells, Coniferous Tree Cones and Their Mixtures. *Renewable Energy*, 2023, vol. 122, pp. 248–258.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.122>

17. Gendek A., Piętko J., Aniszewska M., Malat'ák J., Velebil J., Tamelová B., Krilek J., Moskalik T. Energy Value of Silver Fir (*Abies alba*) and Norway Spruce (*Picea abies*) Wood Depending on the Degree of its Decomposition by Selected Fungal Species. *Renewable Energy*, 2023, vol. 215, art. no. 118948. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118948>

18. Gonçalves A.C., Malico I., Sousa A.M.O. Energy Production from Forest Biomass: An Overview. *Forest Biomass – From Trees to Energy*, IntechOpen, 2021, pp. 1–23. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93361>
19. Sui H., Chen J., Cheng W., Zhu Y., Zhang W., Hu J., Jiang H., Shao J., Chen H. Effect of Oxidative Torrefaction on Fuel and Pelletizing Properties of Agricultural Biomass in Comparison with Non-Oxidative Torrefaction. *Renewable Energy*, 2024, vol. 226, art. no. 120423. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120423>
20. He H., Wang W., Sun Y., Sun W., Wu K. From Raw Material Powder to Solid Fuel Pellet: A State-of-the-Art Review of Biomass Densification. *Biomass and Bioenergy*, 2024, vol. 186, art. no. 107271. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107271>
21. Krajnc N. *Wood Fuels Handbook*. Pristina, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. 31 p.
22. Librenti I., Ceotto E., Di Candilo M. Biomass Characteristics and Energy Contents of Dedicated Lignocellulose Crops. *Proceedings of the Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. Italy, Venice, 2010. 8 p.
23. Nasser R.A., Aref I.M. Fuelwood Characteristics of Six Acacia Species Growing Wild in the Southwest of Saudi Arabia as Affected by Geographical Location. *BioResources*, 2014, vol. 9, iss. 1, pp. 1212–1224. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1212-1224>
24. Petráš R., Mecko J., Kukla J., Kuklová M., Krupová D., Pástor M., Raček M., Pivková I. Energy Stored in Above-Ground Biomass Fractions and Model Trees of the Main Coniferous Woody Plants. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 22, art. no. 12686. <https://doi.org/10.3390/su132212686>
25. Piętko J., Gendek A., Malaťák J., Velebil J., Moskalik T. Effects of Selected White-Rot Fungi on the Calorific Value of Beech Wood (*Fagus sylvatica* L.). *Biomass and Bioenergy*, 2019, vol. 127, art. no. 105290. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105290>
26. Zeng W.-s., Tang S.-z., Xiao Q.-h. Calorific Values and Ash Contents of Different Parts of Masson Pine Trees in Southern China. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25, pp. 779–786. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0525-3>

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

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-189-200

Стимулирование всхожести и энергии прорастания семян сосны обыкновенной биохимическими препаратами

А.А. Дрочкова, аспирант; ResearcherID: [H-1869-2019](https://orcid.org/0000-0003-3503-5767),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3503-5767>

Н.Р. Сунгурова[✉], д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Д.Н. Клевцов, д-р биол. наук; ResearcherID: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902157X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902157X>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.sungurova@narfu.ru[✉], annadrochkova@gmail.com, d.klevtsov@narfu.ru

Поступила в редакцию 28.09.24 / Одобрена после рецензирования 11.12.24 / Принята к печати 13.12.24

Аннотация. В настоящее время остается актуальной задача получения высококачественного посадочного материала, применяемого при лесовосстановлении. Активации всхожести и энергии прорастания семян добиваются при помощи стимулирующих препаратов. Цель работы – изучение эффективности использования различных стимулирующих препаратов на посевные качества семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Объекты исследования – семена *Pinus sylvestris* L., замоченные в растворах препаратов с предполагаемым стимулирующим действием. Применяли препараты: технические лигносульфонаты, экстракты луба березы, фильтрат, полученный при выделении суберина из бересты, Флавобактерин, Мизорин, конденсат, образующийся при сушке пиломатериалов, пепел вулкана Эйяфьядлайёкюдль. В опытах было принято несколько временных вариантов замачивания семян: 6, 12 и 24 ч. Наибольшие всхожесть и энергию прорастания наблюдали у семян, замачивание которых проводили 24 ч. Показатели посевного материала, замоченного на 6 и 12 ч по сравнению с контрольной пробой сухих семян также увеличились. Наилучшая всхожесть была у семян, обработанных растворами нитрозированных и хлорированных лигносульфонатов с концентрацией 10 % в течение 24 ч (95 %), наибольшая энергия прорастания (86 %) – у семян, оставленных на 24 ч в экстракте фракции луба березы менее 1 мм (концентрация 1:10 000) и фильтрате от выделения суберина из бересты (концентрация 1:10 000). В контрольном варианте всхожесть семян составила 80 %.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., семена сосны, стимулятор роста, посевные качества

Для цитирования: Дрочкова А.А., Сунгурова Н.Р., Клевцов Д.Н. Стимулирование всхожести и энергии прорастания семян сосны обыкновенной биохимическими препаратами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 189–200.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-189-200>

Stimulation of Germination and Germination Energy of Scots Pine Seeds with Biochemical Preparations

Anna A. Drochkova, Postgraduate Student; ResearcherID: [H-1869-2019](https://orcid.org/0000-0003-3503-5767),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3503-5767>

Natal'ya R. Sungurova✉, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Denis N. Klevtsov, Doctor of Biology; ResearcherID: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902157X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902157X>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; annadrochkova@gmail.com, n.sungurova@narfu.ru✉, d.klevtsov@narfu.ru

Received on September 28, 2024 / Approved after reviewing on December 11, 2024 / Accepted on December 13, 2024

Abstract. Currently, the task of obtaining high-quality planting stock used in reforestation remains urgent. Stimulating preparations are used to activate germination and seed germination energy. The aim of the work has been to study the effectiveness of using various stimulating preparations on the sowing qualities of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seeds. The objects of the study have been *Pinus sylvestris* L. seeds soaked in solutions of preparations with a purported stimulating effect. The following preparations have been applied: technical lingosulfonates, birch bark extracts, filtrate obtained by separating suberin from birch bark, Flavobacterin, Mizorin, condensate formed during the drying of sawn timber, and ash from the Eyjafjallajökull Volcano. In the experiments, several time options for soaking seeds have been adopted: 6, 12 and 24 hours. The highest germination and germination energy have been observed in seeds left for 24 hours. The indicators of the seed grain soaked for 6 and 12 hours have also increased compared to the control sample of dry seeds. The best germination has been observed in seeds treated with solutions of nitrosated and chlorinated lingosulfonates at a concentration of 10 % for 24 hours (95 %), the highest germination energy (86 %) has been observed in seeds left for 24 hours in an extract of birch bast fraction less than 1 mm (concentration 1:10,000) and filtrate from the separation of suberin from birch bark (concentration 1:10,000). In the control option, the seed germination has been equal to 80 %.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., pine seeds, growth stimulant, sowing qualities

For citation: Drochkova A.A., Sungurova N.R., Klevtsov D.N. Stimulation of Germination and Germination Energy of Scots Pine Seeds with Biochemical Preparations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 189–200. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-189-200>

Введение

Проблема получения высококачественного посадочного материала для лесовосстановления остается крайне актуальной. Показатели роста семян и саженцев напрямую влияют на их приживаемость и устойчивость к негативным факторам, а следовательно, на дальнейший рост и развитие деревьев. Современные подходы к лесовосстановлению направлены на ускорение выра-

щивания семян, максимальную автоматизацию этого процесса и снижение экономических затрат за счет производства более качественного посадочного материала. Существует множество решений для повышения эффективности лесовосстановления, среди которых применение ростостимулирующих веществ, способных не только положительно воздействовать на всхожесть семян и рост семян, но и значительно улучшать устойчивость деревьев к неблагоприятным внешним воздействиям [1, 2, 11, 12, 19–21]. Исследования влияния фитогормонов на растения стали основой для разработки химических препаратов в области росторегулирования, обладающих комплексным эффектом, включающим стимуляцию роста, развития и физиологических процессов. Кроме того, некоторые регуляторы роста могут повышать адаптивные способности растений в условиях стресса. Разнообразие ростостимулирующих веществ связано с их целенаправленным действием на определенные виды растений, что делает стимуляторы одной из самых динамично развивающихся групп препаратов с постоянно обновляющимся составом [16–18, 23, 24].

Цель исследования – изучить эффективность применения различного рода стимулирующих препаратов на посевные качества семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Объекты и методы исследования

Работы по исследованию посевных качеств семян сосны обыкновенной проводили в лаборатории Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова. Закладывали серию опытов по проращиванию семян сосны обыкновенной 1-го класса качества, предварительно обработанных биологически активными веществами. Семена заготовлены в Архангельской области и имеют сертификат качества. Методика опытов основывалась на ГОСТ 13056.6–97 «Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести», ГОСТ 14161–86 «Семена хвойных древесных пород. Посевные качества. Технические условия» и данных «Словаря-справочника таежного лесокультурника» [14].

Выбор веществ для повышения качества семян сосны осуществлялся в соответствии с их биологически активным составом и опытом использования некоторых из них в качестве стимуляторов роста для сельскохозяйственных культур [3, 4, 6–8, 15]. Для исследования были выбраны следующие препараты: хлорированный и нитрозированный технические лигносульфонаты различной концентрации; экстракт луба березы (фракция менее и более 1 мм) концентрацией 1:100 и 1:10 000; фильтрат, полученный при выделении суберина из бересты, концентрацией 1:100 и 1:10 000; Флавобактерин; Мизорин; конденсат, образующийся при сушке пиломатериалов, без разбавления и в концентрации 1:2; пепел вулкана Эйяфьядлайёкюдль в концентрации 1:8. Пепел собран после извержения вулкана для проведения нашего эксперимента [5]. Есть сведения о том, что на юге Исландии на землях, пострадавших от извержения Эйяфьядлайёкюдля, наблюдается чрезвычайно хороший рост травянистых и зерновых культур. Вулканический пепел оказывает положительное влияние на рост растений из-за высокой концентрации питательных веществ и минералов, особенно железа. Установлено, что на поверхности свежевывавших пепловых частиц сорбируется большое количество фосфа-

тов, реже калия, которые, вероятно, и вызывают повышение урожайности, что говорит о наличии у пепла ростостимулирующих свойств [23]. Для всех веществ, которые изучены в ходе наших опытов, было определено несколько временных вариантов замачивания семян: 6, 12 и 24 ч. Проба состояла из 100 семян, обработанных исследуемым в 1 варианте препаратом. Десятикратная повторность проб в каждом варианте опыта обеспечила достоверность результатов. В качестве контроля высевались сухие семена.

Эксперименты по проращиванию семян осуществляли в климатоканнере «Фитотрон–30» (рис. 1). Прибор позволяет задавать необходимые пределы варьирования параметров в течение периода проращивания семян – температуру и освещенность. В камере предусмотрено светодиодное освещение с изменяемыми спектром и интенсивностью, дающее возможность моделировать полевые условия.

Проращивание проводили на фильтровальных кружках, наложенных на фланелевые подкладки с пришитыми фитильками. Фильтровальные кружки и тканевые подкладки намачивали дистиллированной водой непосредственно перед раскладкой семян. Температура воды и ложа 22 ± 2 °C оставалась неизменной и поддерживалась на протяжении всего проращивания семян.



Рис. 1. Заложение эксперимента по проращиванию семян сосны обыкновенной в климатоканнере «Фитотрон–30»

Fig. 1. Setting up an experiment on the germination of Scots pine seeds in the «Phytotron–30» climate chamber

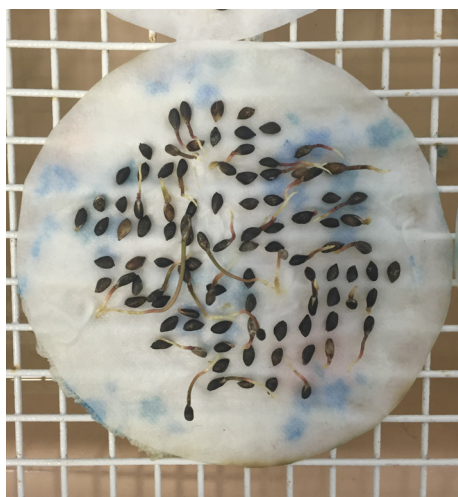
Семена на ложе раскладывали посредством пинцета, не допуская их соприкосновения. Проросшие семена учитывали на 5, 7, 10 и 15-й дни. Первым днем проращивания считали день, следующий за датой раскладки, а окончанием – последние сутки наблюдения за всхожестью семян. Проводя учет проростков, с ложа удаляли нормально проросшие и загнившие семена, заносили данные в карточку анализа отдельно по каждой пробе: количество семян – нормально проросших, загнивших и оставленных на ложе непроросших семян. При раскладке и перед выемкой семян с каждого ложа кончик пинцета протирали ватным тампоном, смоченным в спирте.

К нормально проросшим относятся семена, развившие здоровые корешки длиной не менее длины семени (рис. 2). К непроросшим – семена, которые не проросли в установленный для определения их всхожести срок. К загнившим – семена с мягким разложившимся эндоспермом, с загнившим зародышем, с частично или полностью загнившим корешком.

После окончания проращивания определяли входящие в число основных показатели качества семян сосны обыкновенной – энергию прорастания и всхожесть.

Рис. 2. Прорастание семян
Pinus sylvestris L.

Fig. 2. The germination
of *Pinus sylvestris* L. seeds



Результаты исследования и их обсуждение

Согласно положениям ГОСТ 14161–86 всхожесть семян сосны обыкновенной 1-го класса качества для 1-й зоны заготовки семян (в нее входит Архангельская область) должна составлять 80 %.

Результаты опытов показали наибольшие всхожесть и энергию прорастания у семян, замачивание которых проводили на максимальный из установленных период – 24 ч. Это объясняется строением семян *Pinus sylvestris* L. Пропускная способность оболочки семени за 24 ч замачивания в использованных растворах увеличивалась по сравнению с пропускной способностью при замачивании семян в тех же растворах на 6 и 12 ч. В то же время всхожесть и энергия прорастания замоченных на 6 и 12 ч семян по сравнению с контрольной пробой тоже увеличивались.

Из групп семян, замоченных на 6, 12 и 24 ч, наилучшие показатели всхожести были у семян, обработанных растворами нитрозированных и хлорированных лигносульфонатов с концентрацией 10 % в течение 24 ч (рис. 3). Их средняя всхожесть составила 95 %. Наименьший показатель зафиксирован при замачивании на 6 ч. Самая низкая средняя всхожесть в опыте составила 82 % – для растворов нитрозированных и хлорированных лигносульфонатов (20 и 30 %), экстракта фракции луба березы (1:100), фильтрата от выделения суберина из бересты (1:100), конденсата (1:2). Всхожесть семян в контрольных вариантах в среднем равнялась 80 %.

Наибольшая энергия прорастания (рис. 4) отмечена у семян, замоченных на 24 ч в растворах экстракта фракции луба березы менее 1 мм и фильтрата от выделения суберина из бересты, а именно 86 %. Наименьший показатель характерен для семян, замоченных на 6 ч в растворах нитрозированных (20 %) и хлорированных лигносульфатов (20 и 30 %), экстрактов фракции луба березы (1:10 000), фильтрата от выделения суберина из бересты (1:10 000) и конденсата (1:2). Их средняя энергия прорастания составила 72 %.

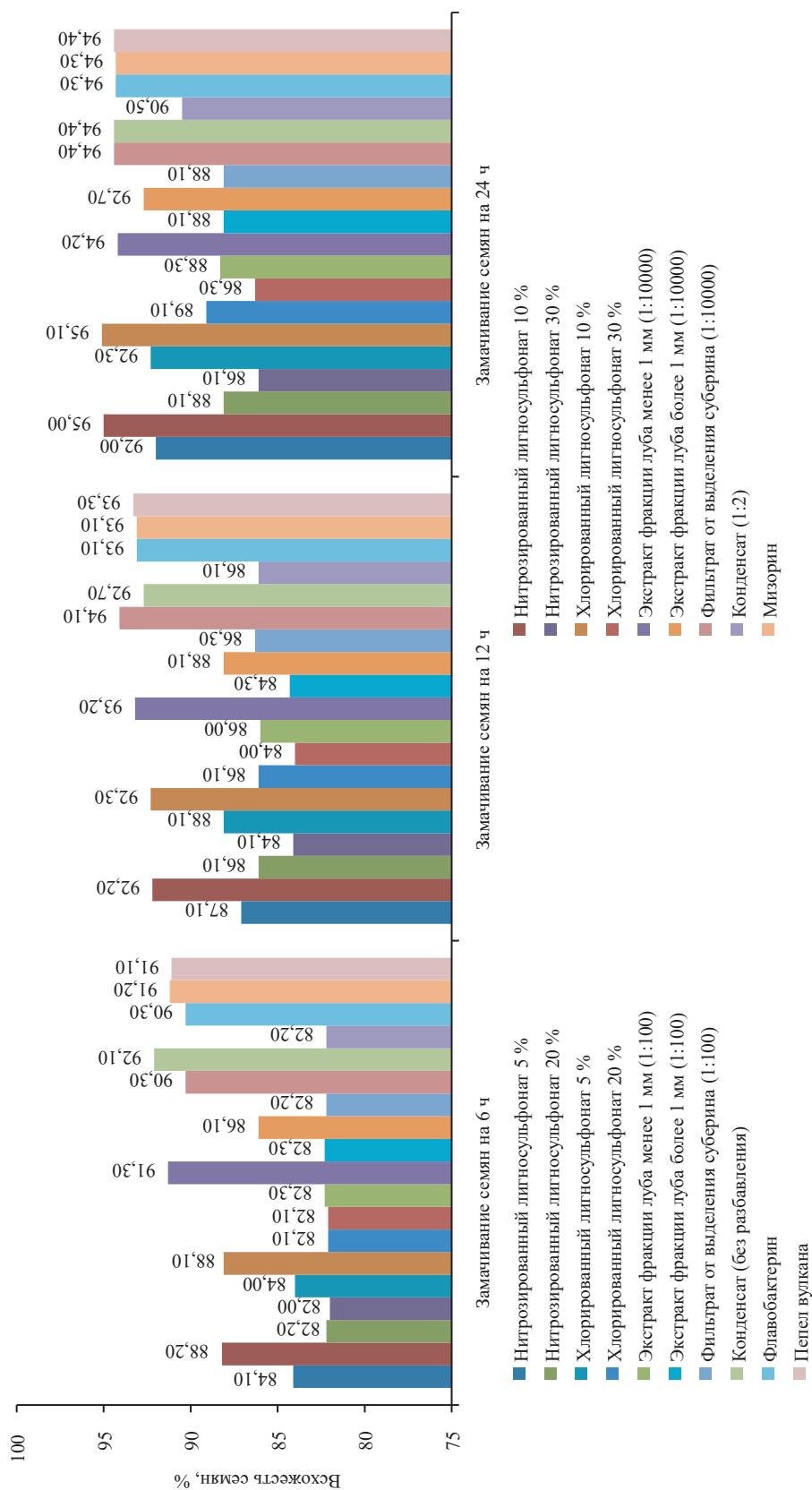


Рис. 3. Средняя всхожесть семян, замоченных в растворах препаратов на 6, 12 и 24 ч

Fig. 3. The average germination of seeds soaked in solutions of preparations for 6, 12 and 24 hours

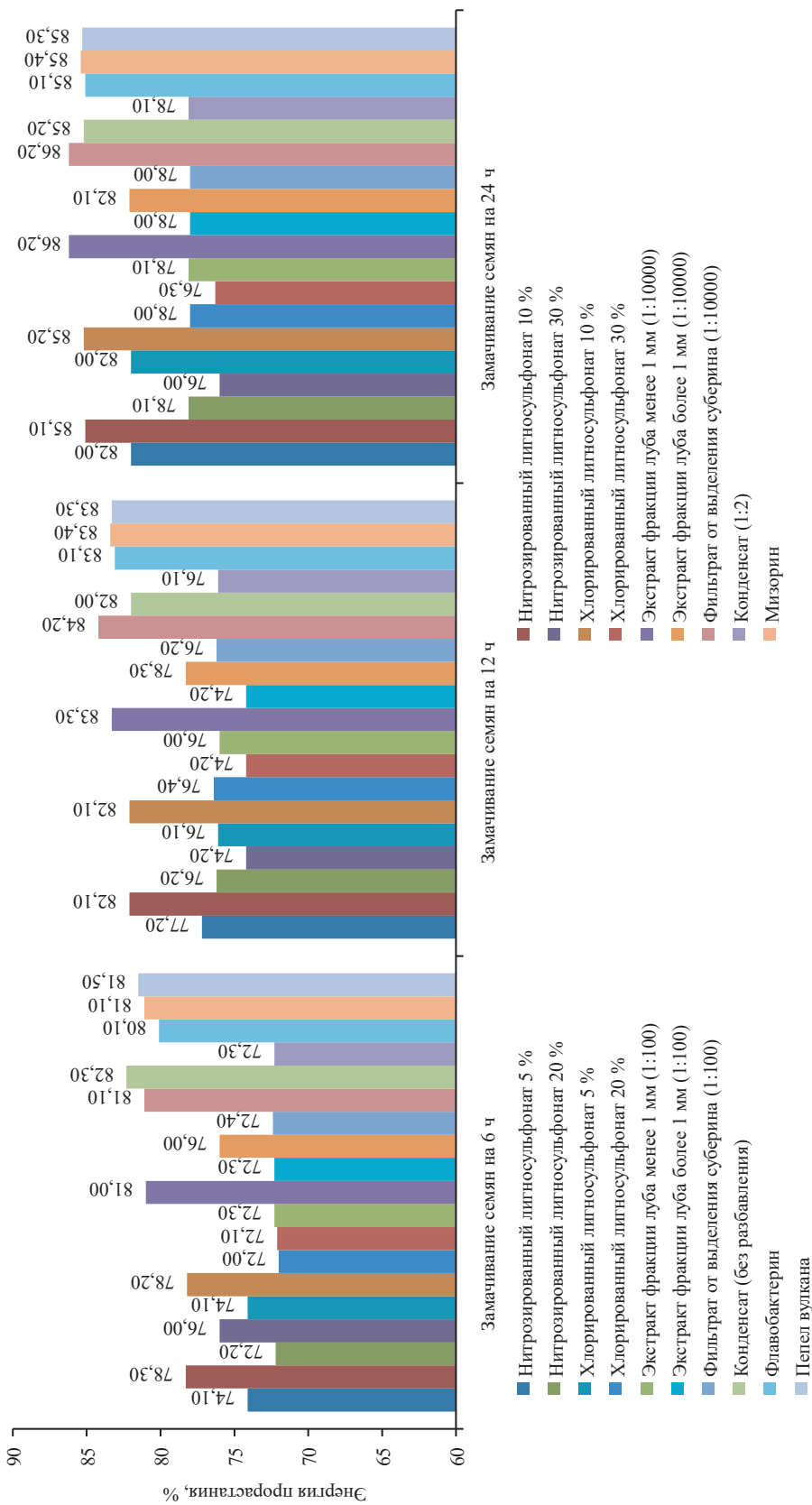


Рис. 4. Средняя энергия прорастания семян, замоченных в растворах препаратов на 6, 12 и 24 ч

Fig. 4. The average germination energy of seeds soaked in solutions of preparations for 6, 12 and 24 hours

Концентрация растворов для замачивания семян повлияла на их всхожесть и энергию прорастания. Так, наилучшая всхожесть семян в группе лигносульфонатов зафиксирована для растворов с концентрацией 10 %, в группе экстрактов фракции луба березы – для растворов с концентрацией 1:10 000 (растворы экстрактов фракции луба березы менее 1 мм), в группе фильтратов от выделения суберина из бересты – для растворов с концентрацией 1:10 000, в группе растворов конденсата – для неразбавленного варианта. Аналогичные высокие показатели получены по энергии прорастания семян, замоченных в растворах этих же концентраций. Для группы растворов технических лигносульфонатов наибольшие энергия прорастания и всхожесть семян были у препаратов с низкими концентрациями (5 и 10 %). Эффективность слабоконцентрированных лигносульфонатов является еще одним преимуществом использования растворов в качестве ростостимуляторов. Минимальный расход препаратов позволит значительно снизить стоимость закупки предполагаемого стимулятора роста. Результаты нашего исследования подтверждаются и данными других ученых [9, 10, 13, 22, 25, 26].

Пределы варьирования количества загнивших семян в опытных вариантах составляли 0–1 %. Контрольный вариант показал 15 % загнивших семян. Это свидетельствует о возможном наличии у используемых препаратов антибактериальных, фунгипротекторных и иммуномоделирующих свойств.

Взаимозависимость энергии прорастания и всхожести семян сосны обыкновенной была определена в ходе корреляционного анализа (см. таблицу). Энергия прорастания имела высокую по шкале Чеддока тесноту связи со всхожестью семян у большинства вариантов. Однако чаще парные линейные коэффициенты корреляции Пирсона при сопоставлении оценок 2 исследуемых признаков демонстрировали преимущественно заметную тесноту связи по указанной шкале. Примером может служить корреляция в вариантах с высокой концентрацией испытуемых веществ и средним временем замачивания.

Корреляция энергии прорастания и всхожести семян сосны обыкновенной, обработанных раствором лигносульфоната натрия 5 % и без обработки
The correlation of germination energy and germination of Scots pine seeds treated with 5 % sodium lingsulfonate solution and without treatment

Продолжительность замачивания, ч	Коэффициент корреляции Пирсона	Основная ошибка коэффициента корреляции	Критерий достоверности коэффициента корреляции
Без замачивания	0,22	0,03	406,00
6	0,22	0,03	135,55
12	0,88	0,02	303,73
24	0,15	0,04	235,64

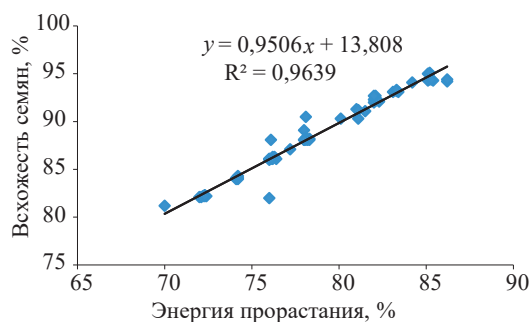
Некоторые варианты проявили слабую тесноту связи, при этом она была как отрицательной, так и положительной. Все представленные корреляции статистически надежны, что обусловлено достаточным для сложившегося уровня изменчивости признаков числом наблюдений и учетов (рис. 5).

Энергия прорастания и всхожесть семян имеют надежную взаимосвязь, которая описывалась уравнениями вида $y = ax + b$. Зависимость одного показателя

теля качества от другого также надежна (при условии, что $R^2 > 0,5$ или $R^2 \approx 0,5$, $y = 0,9506x + 13,808$; $R^2 = 0,9639$).

Рис. 5. Корреляция энергии прорастания и всхожести семян сосны обыкновенной, обработанных используемыми в исследовании препаратами

Fig. 5. The correlation of germination energy and germination of Scots pine seeds treated with the preparations used in the study



Заключение

Исследуемые препараты повышали всхожесть и энергию прорастания семян сосны обыкновенной. Наилучшие показатели были отмечены у семян, предварительно замоченных в 5%- и 10%-х растворах технических лигносульфонатов в течение 24 ч. Технические лигносульфонаты, экстракты луба березы, фильтрат, полученный при выделении суберина из бересты, Флавобактерин, Мизорин, конденсат, образующийся при сушке пиломатериалов, пепел вулкана Эйяфьядлайёкюдль можно рекомендовать для стимулирования всхожести и энергии прорастания семян сосны обыкновенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Барабин А.И., Тутыгин Г.С. Состояние и проблемы лесовосстановления на Европейском Севере // Сб. науч. тр. Архангельск. 1999. С. 4–12.

Babich N.A., Barabin A.I., Tutygin G.S. The State and Problems of Reforestation in the European North. *Collection of Scientific Papers*. Arkhangelsk, 1999, pp. 4–12. (In Russ.).

2. Беляев В.В. Состояние и основные направления повышения эффективности лесовосстановления на Европейском Севере России // Вестн. Поморск. ун-та. 2001. Вып. 2. С. 45–50.

Belyaev V.V. The State and Main Directions for Increasing the Efficiency of Reforestation in the European North of Russia. *Vestnik Pomorskogo Universiteta* = Vestnik of Pomor University, 2001, iss. 2, pp. 45–50. (In Russ.).

3. Дроchkova А.А. Анализ влияния лигносульфонатов на всхожесть и энергию прорастания семян *Pinus sylvestris* L. // Папанинские чтения: ст. участников Междунар. молодеж. науч. конф. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2017. С. 52–55.

Drochkova A.A. Analysis of the Effect of Lignosulfonates on the Germination and Germination Energy of *Pinus sylvestris* L. Seeds. *Papaninskie chteniya* = The Papanin Readings: Articles by Participants of the International Youth Scientific Conference. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2017, pp. 52–55. (In Russ.).

4. Дроchkova А.А. Анализ воздействия конденсата, образующегося при сушке пиломатериалов, на всхожесть и энергию прорастания семян *Pinus sylvestris* L. // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: Вологодск. гос. ун-т. 2020. С. 31–32.

Drochkova A.A. Analysis of the effects of condensate formed during drying of lumber on germination and germination energy of *Pinus sylvestris* L. seeds. *Aktu-*

al'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference. Vologda, Vologda State University Publ., 2020, pp. 31–32. (In Russ.).

5. Дрочкова А.А. Анализ влияния пепла вулкана Эйяфьяллайёкюдль на основные показатели качества семян *Pinus sylvestris* L. // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XLIV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 137–139.

Drochkova A.A. Analysis of the Influence of Eyjafjallajökull Volcano Ash on the Main Quality Indicators of *Pinus sylvestris* L. Seeds. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii*: Collection of Articles of the XLIV International Scientific and Practical Conference. Penza, Nauka i prosveshchenie Publ., 2021, pp. 137–139. (In Russ.).

6. Дрочкова А.А. Влияние времени замачивания семян сосны обыкновенной на их показатели качества // Фундаментальная и прикладная наука: актуальные вопросы теории и практики: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 99–101.

Drochkova A.A. The Influence of Soaking Time of Scots Pine Seeds on Their Quality Indicators. *Fundamental'naya i prikladnaya nauka: aktual'nye voprosy teorii i praktiki*: Collection of Articles of the III International Scientific and Practical Conference. Penza, Nauka i prosveshchenie Publ., 2023, pp. 99–101. (In Russ.).

7. Егорова А.А., Бабич Н.А. Влияние «Флавобактерина» на всхожесть и энергию прорастания семян сосны обыкновенной // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 15. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2012. С. 89–91.

Egorova A.A., Babich N.A. The Effect of “Flavobacterin” on the Germination and Germination Energy of Scots Pine Seeds. *Ekologicheskije problemy Arktiki i severnykh territorij*: Interuniversity Collection of Scientific Papers, iss. 15. Arkhangel'sk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2012, pp. 89–91. (In Russ.).

8. Кунавин А.А., Кутакова Н.А., Дрочкова А.А., Бадогина А.И. Измерение ростостимулирующих свойств экстрактов луба березовой коры // Актуальные проблемы метрологического обеспечения научно-практической деятельности: материалы Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2016. С. 70–74.

Kunavin A.A., Kutakova N.A., Drochkova A.A., Badogina A.I. Measurement of Growth-Stimulating Properties of Birch Bark Bast Extracts. *Aktual'nye problemy metrologicheskogo obespecheniya nauchno-prakticheskoy deyatel'nosti*: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduate Students and Students. Arkhangel'sk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2016, pp. 70–74. (In Russ.).

9. Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю. Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 93–104.

Ostroshenko V.Yu., Ostroshenko L.Yu. Influence of Growth Stimulants on Seed Germination and Seedlings Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 93–104. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-93-104>

10. Пентелькин С.К. Итоги изучения стимуляторов роста и полимеров в лесном хозяйстве за последние 20 лет // Лесохоз. информ. 2003. № 10. С. 34–53.

Pentelkin S.K. Results of the Study of Growth Stimulants and Polymers in Forestry over the Past 20 Years. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2003, no. 10, pp. 34–53. (In Russ.).

11. Родин А.Р., Попова Н.Я. Перспективы использования экологически чистых препаратов в лесных питомниках // Изв. вузов. Лесн. журн. 1991. № 6. С. 3–7.

Rodin A.R., Popova N.Ya. Prospects for the Use of Environmentally Friendly Preparations in Forest Nurseries. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1991, no. 6, pp. 3–7. (In Russ.).

12. Родин А.Р., Попова Н.Я., Кандыба Е.В. Высокоэффективные препараты для питомников // Лесн. хоз-во. 1997. № 1. С. 28–30.

Rodin A.R., Popova N.Ya., Kandyba E.V. Highly Effective Preparations for Nurseries. *Lesnoe khozyajstvo*, 1997, no. 1, pp. 28–30. (In Russ.).

13. Рунова Е.М., Денисенко А.В. Влияние ростогенерирующих препаратов на показатели прорастания семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2024. № 65. С. 125–128.

Runova E.M., Denisenko A.V. The Influence of Growth-Promoting Preparations on the Germination Rates of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seeds. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2024, no. 65, pp. 125–128. (In Russ.).

14. Словарь-справочник таежного лесокультурника: справочн. изд. Архангельск: АГТУ, 2005. 252 с.

Dictionary and Reference Book of the Taiga Forestry Specialist: Reference Book. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2005. 252 p. (In Russ.).

15. Сунгурова Н.Р., Дрочкова А.А., Гаевский Н.П., Волыхина Н.В., Бабич Н.А. Конденсат сушки древесины как активатор энергии прорастания и всхожести семян сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. // Лесн. вестн. 2022. Т. 26, № 4. С. 39–45.

Sungurova N.R., Drochkova A.A., Gayevskiy N.P., Volykhina N.V., Babich N.A. Wood Drying Condensate as *Pinus sylvestris* L. Seeds Germination Activator. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 39–45. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-4-39-45>

16. Тюкавина О.Н., Демина Н.А. Биологически активные препараты для стимуляции роста сеянцев хвойных // Вестн. Бурятск. гос. с.-х. акад. им. В.Р. Филиппова. 2023. № 1(70). С. 122–133.

Tyukavina O.N., Demina N.A. Biologically Active Substances for Stimulating the Growth of Coniferous Seedlings. *Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii imeni V.R. Filippova* = Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov, 2023, no. 1(70), pp. 122–133. (In Russ.).

<https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.70.1.015>

17. Barber J.J. Recent Advances in Planting Techniques. *Forest Farmer*, 1972, vol. 32. 26 p.

18. Calvo P., Nelson L., Kloepper J.W. Agricultural Uses of Plant Biostimulants. *Plant and Soil*, 2014, vol. 383, pp. 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>

19. Davis A.S., Jacobs D.F. Quantifying Root System Quality of Nursery Seedlings and Relationship to Outplanting Performance. *New Forests*, 2005, vol. 30, pp. 295–311. <https://doi.org/10.1007/s11056-005-7480-y>

20. Grossnickle S.C. Why Seedlings Survive: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>

21. Grossnickle S.C., MacDonald J.E. Why Seedlings Grow: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 2018, vol. 49, pp. 1–34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>

22. Hoffmann F. Untersuchungen zur Stickstoffernahrung junger Koniferen. *Archiv fur Forstwesen*, 1966, no. 10, pp. 1093–1103. (In Germ.).

23. Louder R. *Volcanic Ash May Be Helping Vegetation Growth*. Reykjavik, Grapevine Publ., 2010. 24 p.

24. Rikala R. Seedling Production for Reforestation. *Forest Regeneration in the Northern Parts of Europe*: Proceeding of the Finnish-Russian Forest Regeneration Seminar in Vuokatti, Finland, 2000, pp. 127–140.

25. Salaš P., Sasková H., Mokričková J., Litschmann T. Evaluation of Different Types of Rooting Stimulators. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2013, vol. 60, iss. 8, pp. 217–228. <https://doi.org/10.11118/actaun201260080217>

26. Shchukin R.A., Bogdanov O.E., Zavoloka I.P., Ryazanov G.S., Kruglov N.M. Biotechnological Basis for Application of Growth Regulators for Rooting of Green Cuttings of Trees and Shrubs in a Greenhouse with a Misting System. *BIO Web of Conferences*, 2020, vol. 23, art. no. 01009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202301009>

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

Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2025 г.

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Chavchavadze E.S., Shchekalev R.V., Grabovskiy A.A., Romanova V.O. A Strategy for Adapting the Hydraulic System of Woody Plants to Various Tiers of the Floodplain Forest of the Enmyvaam River (Chukotka). № 6-33

Do H.H., Nguyen-Sy T., Tran T.P., Huynh T.D.U., Nguyen T.L.N. Applying GIS to Manage the Current Status of Tree Pests and Diseases in Urban Environment (Da Nang, Socialist Republic of Vietnam). № 5-9

Sungurova N.R., Makarov S.S., Chudetsky A.I., Cheryatova Yu.S. Adaptation Features of Kamchatka Bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) Plants Grown *in vitro*. № 3-121

Tsarev V.A., Tsarev A.P., Tsareva R.P., Laur N.V. Long-Term Testing of Aspen Clones in European Russia. № 3-9

Ананьев В.А., Геникова Н.В., Пеккоев А.Н., Обабко Р.П. Особенности строения и структуры коренного разновозрастного ельника в национальном парке «Водлозерский». № 1-25

Андреева Е.С., Богданова И.В., Сергеева Г.А. Моделирование развития лесных пожаров с учетом пятнистых возгораний. № 5-55

Башегуров К.А., Гавриленко А.Н., Розинкина Е.П., Попов А.С., Залесов С.В., Предеина И.В. Естественное лесовосстановление на вырубках в северо-таежном равнинном районе Западной Сибири. № 1-58

Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кентбаева Б.А., Кентбаев Е.Ж., Бабич Н.А. Пигментный состав

хвои биоты восточной (*Platyclusus orientalis* (L.) Franco) при интродукции в условиях России и Казахстана. № 3-63

Вараксин Г.С., Чербакова Н.Н. Влияние сроков черенкования на укореняемость черенков некоторых видов ивы в Норильском промышленном районе. № 3-52

Вахнина И.Л., Носкова Е.В., Мыглан В.С. Радиальный прирост лиственницы даурской (*Lárix dahúrica* Turcz.) в условиях Станового нагорья. № 4-35

Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Мартынова М.В., Фазлутдинов И.И. Вариативность диаметров деревьев в древостоях липы мелколистной. № 1-42

Гайсин И.К. Послепожарные изменения в светлохвойных лесах Башкирского заповедника. № 1-98

Гордеева Г.Н. Биолого-морфологическая характеристика видов рода *Crataegus* L. в дендрарии Хакасии. № 4-50

Дебков Н.М. Состояние кедровников на южной границе ареала Западной Сибири. № 4-77

Дмитриев Е.В., Говедар З.В., Мельник П.Г., Кондранин Т.В. Спутниковый мониторинг состояния насаждений ели сербской (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская). № 6-9

Ермакова М.В. Особенности выращивания посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесных питомниках Зауралья. № 4-20

Загурская Ю.В., Сиромля Т.И. Элементный химический состав

Populus tremula в условиях техногенных экосистем Кузбасса. № 3-107

Иванова Ю.Д., Ковалев А.В., Суховольский В.Г. Фитомасса фракций деревьев по модели рангового распределения. № 2-63

Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Волков А.Г., Богданов А.П., Буньков Н.А. Влияние почвенных свойств в дискретных микроповышениях на рост сеянцев ели обыкновенной *Picea abies* (L.) Karst. № 6-60

Калько Г.В., Андреев А.Е. Загрязнение хвои ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) тяжелыми металлами в условиях техногенных выбросов. № 4-91

Каплина Н.Ф. Вековые циклы радиального прироста и жизненного состояния дуба черешчатого в дубравах южной лесостепи. № 2-9

Климов Б.Б., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Состав фитоценозов на лесных гарях Бурятии. № 1-134

Коба В.П., Коренькова О.О., Макаров Н.А. Жизнеспособность пыльцы природных популяций *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba Горного Крыма. № 2-24

Корчагов С.А., Сурина Е.А., Конишатов О.А., Минин Н.С., Гоголева Л.Г. Лесоводственная оценка комплексных рубок в лесах Вологодской области. № 1-71

Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Модифицированная методика расчета региональных шкал пожарной опасности в лесах. № 1-9

Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Сравнительные эколого-физиологические характеристики реакции семенных древостоев дуба (*Quercus robur* L.) на лесорастительные условия. № 6-48

Лоренц А.С., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Применение модульных иглофильтров для аккумуляции

грунтовых вод при тушении лесных пожаров. № 5-68

Малышева Н.В., Золина Т.А., Филипчук А.Н. Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов. № 1-83

Манаенков А.С., Подгаецкая П.М. Водный режим защитных лесных полос в сухой степи Алтайского края. № 1-115

Манов А.В., Кутявин И.Н. Структура и состояние древесного яруса коренных ельников притундровой зоны в бассейне Печоры. № 5-26

Машкина О.С., Табацкая Т.М. Адаптация к условиям почвы отселектированных на устойчивость к засолению *in vitro* регенерантных линий березы. № 3-78

Мерзленко М.Д., Брынцев В.А., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Лесоводственные особенности деревьев лиственницы европейской разных классов Крафта в лесных культурах. № 4-9

Москалюк Т.А., Репин Е.Н. Эколого-ценотическая структура реликтовой рощи сосны погребальной (*Pinus × funebris* Kom.) в Приморском крае. № 2-112

Осипенко А.Е., Залесов С.В., Башегуров К.А. Эффективность создания культур сосны обыкновенной в сухой степи. № 4-64

Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Особенности реакции старовозрастной сосны при осушении водораздельной территории в Республике Коми. № 6-77

Попкова И.А., Залывская О.С. Биологическая деструкция древесины кленов в урбанизированной среде. № 5-42

Примаков Н.В. Ясеновые ползащитные лесные полосы Кореновского района Краснодарского края. № 5-81

Пшегусов Р.Х., Чадаева В.А. Пространственное распределение сосновых лесов Кавказа. № 2-92

Рего Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Воронова А.М., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода. № 2-38

Саблирова Ю.М., Темботова Ф.А., Пшегусов Р.Х., Цепкова Н.Л. Типологическое и флористическое разнообразие пихтовых насаждений Тебердинского национального парка. № 4-110

Селянина С.Б., Кутакова Н.А., Селянина А.И., Зубов И.Н., Кононов К.А. Плантационная и дикорастущая клюква *Vaccinium oxycoccos* L. на болотах южноприбалтийского типа. № 3-93

Султанова Р.Р., Байтурина Р.Р., Диарова С.В. Оценка трансформации лесов Южного Урала по временным космическим снимкам. № 2-51

Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К., Теринов Н.Н. Лесоводственная оценка 47-летних культур пихты сибирской на Среднем Урале. № 5-92

Тюрин А.П. Динамика изменения лесопожарной опасности в Удмуртской Республике. № 2-76

Хетагуров Х.М., Николаев И.А., Грязькин А.В., Сатцаева И.К., Тхань Чан Чунг. Сокопродуктивность высокогорных кленовников Северного Кавказа. № 6-106

Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Робонен Е.В., Нелаева К.Г. Синтетические и природные регуляторы роста растений для выращивания семян древесных пород. № 3-20

Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Егорова А.В., Нелаева К.Г., Копцова Е.А. Морозоустойчивость контейнерных семян сосны обыкновенной в условиях высоких широт. № 6-92

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Gainullin Ren.Kh., Safin R.R., Safina A.V., Gainullin Rish.Kh., Tsvetkova E.M. The Results of Experimental Studies of the Apparent Density of Wood. № 6-119

Kiaei M. Planting Spacing and Variation in Mechanical Properties of Poplar Wood (*Populus deltoids*). № 5-133

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. № 4-154

Sushko O.P., Efimova M.V. Analysis of the Timber Industry Complex of Forest-Rich Countries. № 2-154

Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н. Инженерная модель ножевого катка для осветления лесных культур. № 3-132

Добрецов Р.Ю., Добрецова С.Б., Войнаш С.А., Соколова В.А. Распределение мощности в трансмиссиях лесных и транспортных колесных машин. № 4-143

Драпалюк М.В., Дручинин Д.Ю., Попов М.А. Влияние конструктивных параметров рабочих органов лесного плуга на профиль формируемого линейного микроповышения поверхности. № 5-107

Дягилева А.Б., Смирнова А.И., Ленивцев П.И. Лесопромышленный комплекс и процесс техногенеза. № 1-177

Королев А.С., Шарапов Е.С., Быков А.О., Егшин О.С. Оценка физико-механических свойств древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) ультразвуковыми преобразователями разной частоты. № 5-143

Королев А.С., Шарапов Е.С., Егшин О.С. Определение скрытых

дефектов в перекрестноклееных плитах из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.). № 2-143

Лычаков А.А., Куликов К.Н., Евгенов В.Н., Лодочников С.В. Особенности пропитки древесины водорастворимыми защитными средствами. № 4-164

Любов В.К. Повышение эффективности использования побочных продуктов фанерного производства. № 3-155

Огурцов В.В., Каргина Е.В., Орлов А.А., Дук Д.В. Синхронизация технологий раскряя бревен и сушки пиломатериалов. № 6-131

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. № 4-130

Посыпанов С.В., Карпачев С.П., Клевеко В.И. Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов. № 1-164

Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Комисар В.П. Имитационное моделирование технологических процессов лесозаготовки. № 1-145

Сафин Р.Г., Валеев К.В., Фахрудинова Л.Р. Свойства коры березы, влияющие на сепарацию бересты от луба. № 1-197

Солдатов А.В., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Уразова А.Ф. Обоснование сырьевого обеспечения лесопромышленного предприятия. № 2-128

Терехин А.П., Марьяндышев П.А., Голованова И.И., Громов А.А. Термическое разложение пеллет из смеси торфа и кородревесных отходов. № 3-145

Шапиро В.Я., Куницкая О.А., Каляшов В.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П., Тихонов Е.А. Работоспособность трасс трелевочных волоков и технологических коридоров на многолетней мерзлоте. № 5-120

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Aydın M., Kara M.E., Çamlıbel O. Influence of Décor and Overlay Paper Mass on Laminate Floor Product Properties. № 2-172

Loginova (Kokina) E.S., Boykova T.E., Bogdanovich N.I., Vorontsov K.V. Purification of Liquid Radioactive Waste with Activated Carbon from Sludge-Lignin. № 3-184

Вешняков В.А., Ёкубжанов М.Р., Пиковской И.И., Хабаров Ю.Г. Нитрование гидролизного лигнина азотной кислотой в диметилсульфоксиде и воде. № 4-185

Галеева Л.Р., Хадеева А.А., Якупов С.Н., Байгильдеева Е.И. Барьерные и прочностные свойства мешочной бумаги с покрытием из агар-агара. № 6-169

Галиева А.Р., Крякунова Е.В., Мингазова Л.А., Канарская З.А., Канарский А.В., Кузнецов А.Г. Ферментативный гидролиз арабиногалактана древесины лиственницы сибирской. № 5-153

Казицин С.Н., Василишин Д.В., Шишмарева А.В., Ворончихин В.Д., Косарев И.А., Гурьев А.В. Конструкционная прочность изделий из гофрированного картона. № 1-210

Лысаченкова М.М., Казаков Я.В., Чухчин Д.Г. Характеристика полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги. № 3-169

Плахина Д.С., Богданович Н.И. Активные угли из водорослевого остатка альгинатного производства, содержащего измельченную древесину. № 5-169

Сафин Р.Г., Валеев К.В., Зиятдинова Д.Ф. Экстракция биологически активных веществ из коры и листьев деревьев семейства Salicaceae. № 4-173

Содилов И.С., Щербак Н.В. Сравнительный анализ тароупаковочного картона, полученного из различных видов целлюлозного волокнистого сырья. № 6-142

Тамби А.А. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе дицетата целлюлозы. № 2-183

Хабаров Ю.Г., Скрипников Е.А., Вешняков В.А., Плахин В.А. Применение катионитов при модификации сульфатного лигнина азотистой кислотой. № 6-155

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Денисов С.А., Домрачева З.Н., Волдаев М.Н. Лесоводственные основы технологий освоения товарных горельников после низовых пожаров. № 5-187

Дрочкова А.А., Сунгурова Н.Р., Клевцов Д.Н. Стимулирование всхожести и энергии прорастания семян сосны обыкновенной биохимическими препаратами. № 6-189

Карбасников А.А., Карбасникова Е.Б., Залывская О.С., Мелехов В.И. Опыт ступенчатой интродукции дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях северных широт. № 3-204

Коптев С.В., Алабдуллахалханов Хасан. Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем. № 2-210

Лебедева О.П., Александрова Ю.В., Бабич Н.А. Вариативность морфолого-биологических характеристик диаспор восточноазиатских представителей трибы *Maleae*, культивируемых в приарктическом регионе. № 5-198

Парамонов А.А., Карабан А.А., Усольцев В.А., Цветков И.В., Третьяков С.В., Цепордей И.С. Возрастная реверсия рангового распределения фракций надземной биомассы рода *Salix* L. № 5-180

Попова С.В., Матвеева Р.Н. Изменчивость показателей шишек и семян кедров корейского в условиях интродукции. № 2-200

Тюкавина О.Н., Васькин С.А., Корепин Д.Ю., Феклисов П.А., Мелехов В.И., Макаров С.С. Теплотворная способность деструктированной стволовой древесины ели *Picea abies* (L.). № 6-179

Феклисов П.А., Пинаевская Е.А., Неверов Н.А., Болотов И.Н., Тарханов С.Н., Тюкавина О.Н. Температурные характеристики стволов сосны в северной подзоне тайги. № 3-195