

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

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

2023

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

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

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

2023

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

EDITORIAL BOARD:

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- В.В. Фомин, Н.С. Иванова, С.В. Залесов, А.С. Попов, А.П. Михайлович.* Лесные типологии в Российской Федерации..... 9
- Т.А. Пристова, А.Л. Федорков, А.Б. Новаковский.* Надземная фитомасса древостоя в экспериментальных культурах сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми..... 31
- Н.В. Танцырев, С.Н. Санников, В.А. Усольцев.* Географические особенности возобновления *Pinus sibirica* Du Tour..... 44
- D. Jagdag, G. Batsaikhan, N. Baatarbileg, A.I. Lobanov, S. Gerelbaatar.* Effect of Nutrient Substrate on Seedling Growth and Biomass Allocation of *Picea obovata* Ledeb. in Northern Mongolia..... 57
- С.В. Третьяков, С.В. Контев, А.А. Карабан, А.А. Парамонов, А.В. Давыдов.* Возрастная динамика нормальных древостоев ольхи серой в таежной зоне северо-востока европейской части России..... 70
- Б.В. Раевский, А.А. Ильинов, М.В. Медведева, О.В. Рудковская.* Система мониторинга природной динамики лесного массива заповедника «Костомукшский»..... 81
- А.Н. Соболев, П.А. Феклистов, Н.А. Неверов, С.С. Макаров.* Относительная высота деревьев в изолированных популяциях сосновых древостоев.... 102

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- П.В. Будник, В.Н. Баклагин, О.Н. Галактионов.* Лесоэксплуатационное районирование лесных субарктических территорий..... 114

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- В.А. Шамаев, И.Н. Медведев, А.В. Руссу.* Режимы пропитки сортиментов из древесины сосны маслянистыми антисептиками..... 136
- А.А. Титунин, М.С. Геворкян, А.А. Федотов, Т.Н. Вахнина, И.В. Сусоева.* Научное обоснование использования древесины осины в деревянных клееных конструкциях..... 149

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

- Р.А. Иксанов, А.В. Канарский, З.А. Канарская, В.М. Гематдинова, Е.В. Белкина.* Культивирование *Dunaliella salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитных щелоков..... 162
- К.С. Вашукова, К.Ю. Терентьев, Д.Г. Чухчин, А.Д. Ивахнов, Д.Н. Пошина.* Влияние топологической структуры целлюлозы на процессы ацетилирования и нитрования..... 176
- О.С. Бровка, И.А. Паламарчук, Н.А. Горшкова, Н.И. Богданович, А.Д. Ивахнов.* Сорбционно-структурные свойства аэрогельных материалов на основе биополимеров..... 190

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- И.А. Гончарова, Л.Н. Скрипальщикова, А.П. Барченков.* Динамика нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных сосновых ценозах Красноярской лесостепи..... 204
- Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2023 г..... 215
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>V.V. Fomin, N.S. Ivanova, S.V. Zalesov, A.S. Popov, A.P. Mikhailovich.</i> Forest Typologies in the Russian Federation.....	9
<i>T.A. Pristova, A.L. Fedorkov, A.B. Novakovsky.</i> Aboveground Stand Phytomass in Experimental Cultures of Lodgepole Pine in Syktyvkar Forestry of the Komi Republic.....	31
<i>N.V. Tantsyrev, S.N. Sannikov, V.A. Usoltsev.</i> Geographical Features of <i>Pinus sibirica</i> Du Tour Renewal.....	44
<i>D. Jagdag, G. Batsaikhan, N. Baatarbileg, A.I. Lobanov, S. Gerelbaatar.</i> Effect of Nutrient Substrate on Seedling Growth and Biomass Allocation of <i>Picea obovata</i> Ledeb. in Northern Mongolia.....	57
<i>S.V. Tretyakov, S.V. Koptev, A.A. Karaban, A.A. Paramonov, A.V. Davydov.</i> Growth Tables of Normal Gray Alder Stands in the Taiga Zone of the North-East of the European Part of Russia.....	70
<i>B.V. Raevsky, A.A. Ilinov, M.V. Medvedeva, O.V. Rudkovskaya.</i> The Natural Dynamics Monitoring System of the Forests in the Kostomukshsky Reserve.....	81
<i>A.N. Sobolev, P.A. Feklistov, N.A. Neverov, S.S. Makarov.</i> Relative Tree Height in Isolated Populations of Pine Stands.....	102

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>P.V. Budnik, V.N. Baklagin, O.N. Galaktionov.</i> Forest Exploitation Zoning of Forest Subarctic Territories.....	114
--	-----

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>V.A. Shamaev, I.N. Medvedev, A.V. Russu.</i> Impregnation Regimes of Pine Wood Assortments with Oily Antiseptics.....	136
<i>A.A. Titunin, M.S. Gevorgyan, A.A. Fedotov, T.N. Vakhnina, I.V. Susoeva.</i> Scientific Substantiation of Aspen Wood Use in Wooden Glued Structures.....	149

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

- R.A. Iksanov, A.V. Kanarsky, Z.A. Kanarskaya, V.M. Gematdinova.* Cultivation of *Dunaliella salina* Microalgae in the Nutrient Medium from Neutral-Sulfite Alkalis..... 162
- K.S. Vashukova, K.Y. Terentyev, D.G. Chukhchin, A.D. Ivakhnov, D.N. Poshina.* Effect of Topological Structure of Cellulose on the Processes of Acetylation and Nitration..... 176
- O.S. Brovko, I.A. Palamarchuk, N.A. Gorshkova, N.I. Bogdanovich, A.D. Ivakhnov.* Sorption and Structural Properties of Aerogel Materials Based on Biopolymers..... 190

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- I.A. Goncharova, L.N. Skripalschikova, A.P. Barchenkov.* Dynamics of Understory Vegetation Cover in Anthropogenically Disturbed Pine Cenoses of Krasnoyarsk Forest-Steppe..... 204
- Index of Articles Published in the Russian Forestry Journal in 2023..... 215
-




Обзорная статья

УДК 630*187

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-9-30

Лесные типологии в Российской Федерации

В.В. Фомин¹ , *д-р биол. наук, доц.*; *ResearcherID: J-3404-2017*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

Н.С. Иванова^{1,2}, *д-р биол. наук*; *ResearcherID: O-8367-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>

С.В. Залесов¹, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: H-2605-2019*,


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

А.С. Попов¹, *канд. с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: AAN-6020-2021*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3060-9461>

А.П. Михайлович³, *ст. преподаватель*; *ResearcherID: AAN-5903-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; fomval2011@yandex.ru , i.n.s@bk.ru, zalesov@usfeu.ru, sergeich66@yandex.ru


²Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; i.n.s@bk.ru

³Уральский федеральный университет, ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Россия, 620002; anna.mikhailovich@gmail.com

Поступила в редакцию 05.05.21 / Одобрена после рецензирования 27.08.21 / Принята к печати 29.08.21

Аннотация. Цель работы – сравнительный анализ основных российских лесных типологий: лесозоологической Е.В. Алексеева – П.С. Погребняка, фитоценологической В.Н. Сукачева, генетической Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова, динамической И.С. Мелехова. Сравнение выполнено по следующим позициям: содержание понятия классификационной единицы (тип условий местопроизрастания, тип леса); особенности выделения границы классификационных единиц; классификационные признаки для определения типа условий местопроизрастания; отличительные черты классификации фитоценозов для установления типа леса; степень учета сукцессионной динамики лесных насаждений и влияния антропогенных факторов; уровень внедрения в практику лесного хозяйства и регионы внедрения. Установлено, что в процессе развития лесных типологий понятие о типе леса изменялось от участка леса, однородного по составу, строению и внешнему облику (однородность в пространстве), в естественных классификациях до представлений о типе леса, с приоритетом однородности по происхождению (генезису), процессам развития и динамике (однородность во времени) в сравнении с однородностью состава и структуры в генетических и динамической типологиях. Приведено географическое распространение лесозоологических, фитоценологических и генетических классификаций типов леса в Российской Федерации на настоящий момент. Лесозоологические классификации используются в основном в южных регионах

© Фомин В.В., Иванова Н.С., Залесов С.В., Попов А.С., Михайлович А.П., 2023

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

европейской части России и на Северном Кавказе. Лесные типологии, созданные на основе генетического подхода, нашли применение в Западной Сибири, на юге Дальнего Востока и в Восточной Сибири, в некоторых регионах Урала. В остальных субъектах Российской Федерации используются фитоценоотические классификации типов леса. Объединение существующих типологий в единую классификацию возможно на основе генетического подхода, т. к. естественные типологии в рамках данного подхода могут являться составной частью генетических классификаций. Решение проблемы объединенного использования в одном регионе разных типологий обеспечит уровень лесоустройства, позволяющий оптимизировать лесопользование и сравнивать полученные данные как для субъектов Российской Федерации, так и для страны в целом.

Ключевые слова: лесная типология, естественные классификации типов леса, генетические классификации типов леса, лесоэкологическая типология, фитоценоотическая типология, динамическая типология, генетическая типология, лесотипологические исследования в России

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-14-50422), по грантам Министерства науки и высшего образования (FEUG 2022-0002, FEUZ 2022-0023) и в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН. Авторы благодарят сотрудников филиалов ФГБУ «Рослесинфорг»: «Амурлеспроект», Башкирского филиала, Бурятского филиала, «Воронежлеспроект», Вятского филиала, «Дальлеспроект», Казанского филиала, «Кареллеспроект», Камчатского филиала, филиала по Республике Марий-Эл, Омского филиала, Пензенского филиала, Пермского филиала, «Прибайкаллеспроект», Приморского филиала, филиала по Республике Коми, Рязанского филиала, Тверского филиала, «Центрлеспроект» – за информацию об использовании лесотипологических классификаций в регионах, а также выражают признательность отдельным сотрудникам: Хребтову А.Г., Корсикову Р.С. и Солодько В.И. («Запсиблеспроект»), Нифневичу А.Е. («Востсиблеспроект»), Протченко Г.К. («Мослеспроект»), Петухову Н.В. («Поволжский леспроект»), Шушарину А.П. («Севлеспроект»), Лобанову А.И. («Севзаплеспроект»), Торхову С.В. (Архангельский филиал).

Для цитирования: Фомин В.В., Иванова Н.С., Залесов С.В., Попов А.С., Михайлович А.П. Лесные типологии в Российской Федерации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 9–30. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-9-30>

Review article

Forest Typologies in the Russian Federation

Valery V. Fomin^{1✉}, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [J-3404-2017](https://orcid.org/0000-0002-9211-5627),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

Natalya S. Ivanova^{1,2}, Doctor of Biology; ResearcherID: [O-8367-2019](https://orcid.org/0000-0003-0845-9433),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>

Sergey V. Zalesov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

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

Artem S. Popov¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAN-6020-2021](https://orcid.org/0000-0002-3060-9461),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3060-9461>

Anna P. Mikhailovich³, Senior Lecturer; ResearcherID: [AAN-5903-2020](https://orcid.org/0000-0002-8282-9431),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

¹Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirsky Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian



Federation; fomval@gmail.com[✉], i.n.s@bk.ru, zalesov@usfeu.ru, sergeich66@yandex.ru

²Botanical Garden of Ural Branch of RAS, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; i.n.s@bk.ru

³Ural Federal University, ul. Mira, 19, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; anna.mikhailovich@gmail.com

Received on May 5, 2021 / Approved after reviewing on August 27, 2021 / Accepted on August 29, 2021

Abstract. The aim of the work is to conduct a comparative analysis of the main Russian forest type classifications: forest-ecological classification by E.V. Alekseev – P.S. Pogrebnnyak, phytocoenotic classification by V.N. Sukachev, genetic classification by B.A. Ivashkevich – B.P. Kolesnikov and dynamic one by I.S. Melekhov. The comparison is made on the following positions: the content of the concept of classification unit (type of habitat conditions, forest type); peculiarities of the classification unit boundary; classification features for determining the type of habitat conditions; distinctive features of phytocenosis classification for establishing the forest type; the degree of consideration of successional dynamics of forest plantations and the influence of anthropogenic factors; the level of implementation in forestry practice and regions of implementation. It is established that during the development of forest typologies the idea of forest type changed from a forest area that is homogeneous in composition, structure and appearance (homogeneity in space) in natural classifications to the idea of forest type with the priority of homogeneity in origin (genesis), development processes and dynamics (homogeneity in time) in comparison with the homogeneity of composition and structure in genetic and dynamic typologies. The geographical distribution of forest-ecological, phytocenotic and genetic classifications of forest types in the Russian Federation at the present moment is given. Forest-ecological classifications are used mainly in the southern regions of the European Russia and in the North Caucasus. Forest typologies based on the genetic approach to forest type classification are used in Western Siberia, in the south of the Far East and Eastern Siberia, and in some regions of the Urals. In the rest of the Russian Federation, phytocenotic classifications of forest types are used. The unification of existing typologies into a single classification is possible on the basis of the genetic approach, as natural typologies within the framework of this approach can be a component of genetic classifications. The solution of the problem of combining the use of different typologies in one region will provide the level of forest inventory, allowing to optimize forest management and compare the obtained data both for the subjects of the Russian Federation and for the country as a whole.

Keywords: forest typology, natural classifications of forest types, genetic classifications of forest types, forest-ecological typology, phytocenotic typology, dynamic typology, genetic typology, forest typology research in Russia

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR grant No. 20-14-50422), by grants of the Ministry of Science and Higher Education (FEUG 2023-0002, FEUZ 2023-0023) and within the framework of the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The authors thank the staff of the branches of FGBI "Roslesinfor": "Amurlesproekt", Bashkir branch, Buryat branch, "Voronezhlesproekt", Vyatka branch, "Dallesproekt", Kazan branch, "Karellesproekt", Kamchatka branch, branch for the Republic of Mari-El, Omsk branch, Penza branch, Perm branch, "Pribaikallesproekt", Primorsky branch, Komi Republic branch, Ryazan branch, Tver branch, "Tsentrlesproekt" – for information on the use of forest typological classifications in the regions, and also express their gratitude to individual employees: Khrebtov A.G., Korsikov R.S. and Solodko V.I. ("Zapsiblesproekt"), Nifnevich A.E. ("Vostsiblesproekt"), Protchenko G.K. ("Moslesproekt"), Petukhov N.V. ("Povolzhsky lesproekt"), Shusharin A.P. ("Sevlesproekt"), Lobanov A.I. ("Sevzaplesproekt"), Torkhov S.V. (Arkhangelsk branch).

For citation: Fomin V.V., Ivanova N.S., Zalesov S.V., Popov A.S., Mikhailovich A.P. Forest Typologies in the Russian Federation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 9–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-9-30>

В основе современных систем рационального ведения лесного хозяйства лежат лесные типологии. Наиболее интенсивное развитие основных направлений лесотипологических исследований в разных странах северного полушария, которые завершились созданием классификаций типов леса, применяемых в лесном хозяйстве этих стран, происходило с конца XIX и практически до конца XX в. В начале XXI в. научный и практический интерес ученых-лесотипологов сместился в область создания классификаций типов леса, позволяющих на уровне критериев и индикаторов устойчивого управления лесами гармонизировать национальные системы инвентаризации лесов [62–65].

В течение 2-го десятилетия XXI в. наблюдается рост количества публикаций, связанных с вопросами влияния региональных изменений климата на местообитания и лесную растительность, включая воздействие данных изменений на лесопользование и индикаторы, которые применяются, в том числе, и при выделении типов леса [1, 27, 54, 66, 68–71, 76–80]. В связи с этим совершенствование лесотипологических схем в условиях современного изменения климата и антропогенного влияния является одной из актуальных задач лесотипологических исследований.

Ученые Российской империи и СССР разработали ряд оригинальных направлений в области создания лесных типологий, результаты выполненных в то время исследований до сих пор не потеряли своей актуальности [67, 68, 74]. Несмотря на уменьшение в Российской Федерации в конце XX – начале XXI вв. количества посвященных данной теме публикаций, которое было обусловлено в первую очередь социально-экономическими причинами, российские ученые продолжают исследования и разработки в этом направлении [2, 7–9, 11–13, 21, 32, 35, 42–44, 53–55, 59, 61, 70, 73, 78, 79].

Необходимость научных разработок в области гармонизации национальных систем инвентаризации лесов на уровне критериев и индикаторов устойчивого управления лесами в Российской Федерации обусловлена тем, что она входит в число стран, присоединившихся к Монреальскому и Панъевропейскому процессам [63, 81, 82]. Цель этих инициатив состоит в приведении к единству национальных систем инвентаризации лесов. При этом успешное решение данной задачи будет зависеть от ряда условий, в т. ч. от глубины знаний классификаций типов леса, используемых на национальном или наднациональном уровнях специалистами разных стран, входящих в Монреальский и Панъевропейский процессы. Кроме того, возможность свободного доступа к результатам научных исследований в этой области важна для экологов и лиц, принимающих решения на отраслевых, государственном и межгосударственном уровнях.

Цель данной работы – выполнить сравнительный анализ основных классификаций типов леса (лесоэкологической, фитоценотической, генетической и динамической), используемых в Российской Федерации.

Основные классификации типов леса в Российской Федерации. Основные подходы к классификации лесов, этапы развития лесной типологии в Российской империи и СССР, а также особенности разработанных классификаций

типов леса подробно описаны в многочисленных работах [4–6, 11–13, 15, 17, 20, 25, 31, 37, 38, 47–50, 68, 70, 74]. Специалисты выделяют следующие периоды и направления лесотипологических исследований в России и СССР: доморозовский период, учение о типах леса Г.Ф. Морозова, классификация типов леса А.А. Крюденера, лесоэкологическое направление Е.В. Алексеева – П.С. Погребняка, фитоценотическая типология леса В.Н. Сукачева, географогенетическая типология леса Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова и динамическая типология И.С. Мелехова. Хронологически лесотипологические направления, созданные после классификации А.А. Крюденера, развивались параллельно.

В таблице представлены результаты сравнительного анализа основных классификаций типов леса, которые используются в лесном хозяйстве в Российской Федерации в настоящее время. В ряде регионов РФ лесохозяйственные предприятия при инвентаризации лесов применяют авторские классификации типов леса, созданные отечественными исследователями, не названными выше. Однако эти классификации, как правило, можно отнести к одному из направлений лесотипологических исследований, которые представлены перечисленными классификациями. Следует отметить региональные схемы и кадастры типов леса, нашедшие широкое применение как в лесохозяйстве, так и в научных исследованиях [3, 8, 18, 22, 23, 33, 36, 39–41, 46, 57–59], а также классификации вырубок [19, 28, 51]. В основе данных классификаций преобладают ключевые принципы одной из перечисленных в таблице типологий. При этом все эти направления базируются на идеях Г.Ф. Морозова [31]. В процессе развития лесных типологий уточнялось и углублялось понятие типа леса, изменяясь от участка леса, однородного по составу, строению и внешнему облику, до представлений о типе леса с приоритетом однородности по происхождению (генезису), процессам развития и динамике (однородность во времени) по сравнению с однородностью состава и структуры (гомогенностью) в пространстве.

В естественных классификациях, к которым относят лесоэкологическую и фитоценотическую, тип леса рассматривается с точки зрения однородности характеристик компонентов лесного биогеоценоза в пространстве. При данном подходе в тип леса объединяются участки, однородные по комплексу параметров компонентов лесного биогеоценоза, т. е. в основу определения типа леса положены критерии однородности участков леса в пространстве.

В лесоэкологической классификации тип леса определяют лесорастительные условия и, следовательно, каждому типу лесорастительных условий соответствует один тип леса. При этом количество типов леса ограничивается числом выделяемых ячеек в эдафической сетке. Поэтому лесоэкологическую классификацию можно использовать только в тех случаях, когда типы леса соответствуют выделяемым типам лесорастительных условий в пределах эдафической сетки [37]. В южных районах Российской Федерации, где растительный покров сильно изменен и имеет слабую диагностическую способность для определения типов леса, лесоэкологическая классификация хорошо себя зарекомендовала в качестве надежной основы лесопользования.

**Сравнение основных направлений лесной типологии в Российской Федерации
Comparison of features of the main directions in forest typology in the Russian Federation**

Критерий сравнения	Классификация типов леса			
	Лесоэкологическая – Е.В. Алексеева – П.С. Погребняка	Фитоценологическая В.Н. Сукачева	Генетическая Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова	Динамическая И.С. Мелехова
Объем понятия типа леса	Тип леса – это совокупность лесных участков, сходных по почвенно-гидрологическим и климатическим условиям, с влиянием исторического фактора. Определяется по ТЛУ. Траектории объема данного понятия в разное время могут отличаться: от ТЛУ до совокупности лесных биогеоценозов, рассматриваемых в пределах ТЛУ. На практике данная типология получила распространение в районах, для которых ТЛУ соответствуют определенным типам древостоев, поэтому для определения типа леса достаточно определения ТЛУ на основе эдафической сетки. В пределах данной сетки можно выделить только 24 ТЛУ	Тип лесного биогеоценоза, нет ограничений на выделение количества типов леса	Серия взаимосвязанных типов лесных фитоценозов в пределах ТЛУ, т. е. серия типов лесных биогеоценозов, сменяющихся друг друга во времени. Объем понятия типа леса шире, чем в классификации В.Н. Сукачева, нет ограничений на количество выделяемых типов леса	Объем понятия типа леса соответствует классификации В.Н. Сукачева, добавлены этапы развития лесной растительности: тип вырубок и гарей, предусмотрена возможность перехода одного типа леса в другой, нет ограничений на количество выделяемых типов леса
Выделение границы типа леса	По границе ТЛУ для покрытых и не покрытых лесом участков	По границе лесного фитоценоза только для покрытых лесом участков с учетом ТЛУ	По границе ТЛУ для покрытых и не покрытых лесом участков	По границе лесного фитоценоза для покрытых и не покрытых лесом участков с учетом ТЛУ

<p>Классификационные признаки для определения ТЛУ</p>	<p>Предложен алгоритм и разработана база данных для определения ТЛУ по системе П.С. Погребняка (списку доминантов напочвенного покрова), а также для независимой проверки экспертных оценок ТЛУ, содержащихся в лесотаксационных описаниях</p>	<p>Прямо действующие факторы (трофность почв, режим увлажнения и аэрация почвы) оцениваются по косвенным признакам: индикаторам живого напочвенного покрова, положению в рельефе и режиму увлажнения</p>	<p>Высота над уровнем моря (высотный класс) для горных территорий или региональный комплекс лесорастительных условий для равнинных; режим увлажнения, особенности рельефа и почв</p>	<p>Как в классификации В.Н. Сукачева</p>
<p>Классификационные признаки фитоценоза для определения типа леса</p>	<p>Состав древостоя в пределах ТЛУ с учетом требовательности отдельных видов растений к тропности и влажности почв</p>	<p>Состав древостоя, индикаторы живого напочвенного покрова, лесоводственно-таксационные характеристики, бонитет, возобновление</p>	<p>Для покрытых лесом участков – классификационные признаки по В.Н. Сукачеву, среди которых главными являются продуктивность древостоя и особенности естественного возобновления (видовой состав, численность, возрастная структура); для не покрытых лесом участков – наличие и видовой состав подростов древесных растений, а также опisanie доминант живого напочвенного покрова</p>	<p>Для не покрытых лесом участков – характеристики живого напочвенного покрова, для фитоценоза – классификационные признаки по В.Н. Сукачеву</p>

Окончание таблицы

Критерий сравнения	Классификация типов леса			
	Лесоэкологическая сеева – П.С. Погребняка	Фитоценологическая В.Н. Сукачева	Генетическая Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова	Динамическая И.С. Мелехова
Учет сукцессионной динамики	Изначально – на уровне теоретических положений, позже были предприняты попытки учета сукцессионной динамики в классификационных схемах	На уровне теоретических положений (в классификационных схемах заложена возможность прогнозирования смены древостоев на основе данных о возобновлении)	Как на уровне теоретических положений, так и в классификационных схемах возрастная динамика представлены в виде ряда возможных типов фитоценозов, сменяющих друг друга во времени в пределах ТЛУ. Разработаны конкретные схемы проведения лесоустроительных работ	Разработана типология вырубок и гарей как этапа восстановления динамической динамики, предшествующего формированию типа леса; возможность перехода одного типа в другой предусмотрено на уровне теоретических положений
Учет влияния антропогенных факторов	На уровне теоретических положений, косвенные воздействия для прямых антропогенных воздействий, не учитываются		Как на уровне теоретических положений, так и в классификационных схемах по типам вырубок (паловые, беспаловые), предназначения для использования при проведении лесоустроительных работ; косвенные воздействия не учитываются	Разработана типология вырубок и гарей, косвенные воздействия не учитываются
Уровень внедрения в практику лесного хозяйства, регионы внедрения	Высокий (Украина, южные регионы Российской Федерации, Казахстан)	Очень высокий (европейская часть России, регионы Западной и Восточной Сибири)	Высокий (некоторые регионы Дальнего Востока, Урала и Западной Сибири, отдельные регионы европейской части России)	Используется совместно с классификацией В.Н. Сукачева

Примечание: ТЛУ – тип лесорастительных условий.

В динамической и генетической классификациях приоритет критериев пространственной однородности лесных участков при отнесении их к одному типу леса заменен критериями однородности рядов типов лесных биогеоценозов во времени [13, 16, 68]. Региональные генетические классификации основываются на общих принципах, но обязательно учитывают особенности климата, ландшафта, почв. Это делает типологические схемы региональными. Географический принцип Г.Ф. Морозова реализуется в них благодаря требованию указывать в названии типа леса код лесорастительных условий [18, 46, 59]. Для этих целей предложена система буквенных и цифровых обозначений, которая позволяет отразить принадлежность каждого типа леса к соответствующей зоне, подзоне, провинции, высотному поясу, флористическому комплексу биогеоценозов, эдафическому и гидрологическому комплексу лесорастительных условий разного ранга (классы, группы, типы) [18, 46, 59], что обеспечивает типу леса генетической классификации точный географический и экологический «адрес». В этом заключается фундаментальное отличие генетической классификации от динамической, лесоэкологической и фитоценотической. В последних нет строго фиксированных границ использования [18]. Для того чтобы подчеркнуть региональную специфику генетических классификаций, их еще называют географо-генетическими [68]. Тем не менее учет климатических факторов и зональная основа ведения лесного хозяйства признаются важными во всех рассматриваемых в статье лесных типологиях, и именно в этом направлении идет развитие современных российских лесных типологий, в т. ч. разрабатываются теоретические основы составления региональных классификаций на зональной основе [13, 30, 52].

Тип леса в генетических классификациях выделяется в пределах типа лесорастительных условий, который определяется по комплексу следующих характеристик: генезису и форме элементов рельефа, световым условиям, физико-химическим свойствам материнских почвообразующих горных пород и почв, водному режиму, водно-минеральному питанию растений. Тип леса в рамках генетического подхода является этапом лесообразовательного процесса [17].

Типы насаждений (типы фитоценозов) обозначают этапы развития типа леса – в пределах типа лесорастительных условий лесные фитоценозы могут сменять друг друга во времени. При этом внешний облик, состав и структура фитоценозов часто значительно отличаются друг от друга, но все они принадлежат к одному и тому же типу леса [17, 47]. Тип леса в генетической классификации складывается из серии типов насаждений [42, 43], или, другими словами, «тип насаждения является формой существования типа леса, а этот последний представлен генетическим рядом типов насаждений, сменяющих друг друга во времени» [18, с. 30]. Тип леса характеризуется ходом роста древостоя, составленного лесообразующими древесными породами.

Необходимо отметить, что если в естественных классификациях тип насаждения, тип леса и лесной биогеоценоз рассматриваются как синонимы, то в генетической классификации тип леса является более широким понятием. Генетический подход к классификации типов леса не отрицает естественные типологии, а уточняет их. Генетические классификации преемственно связаны с естественными и выступают в качестве их продолжения [14, 16]. В настоящее время в основе генетической классификации Б.А. Ивашкевича –

Б.П. Колесникова используются достижения классификации В.Н. Сукачева. Можно сказать, что последняя была дополнена данными о продолжительности, направлении и темпах разных видов смен.

Проблемы естественной и антропогенной динамики остро актуальны для всех сопоставляемых в статье лесных типологий [13, 30, 52, 71]. Наиболее полно учет динамики реализован в динамической и генетической классификациях. В основу динамической лесной типологии положена классификация В.Н. Сукачева, однако трактовка типа леса расширена. Тип леса в рамках данного направления, как и в географо-генетической типологии Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова, рассматривается в пространстве и времени, т. е. является этапом или серией этапов в развитии леса [24, 61]. В динамической типологии учитываются экзо- и эндогенные изменения, происходящие в лесу, устанавливается возможность перехода одного типа леса в другой, а также взаимосвязь этапов в пределах одного типа леса. Сукцессии на вырубках представляют собой восстановительные (демутационные) смены. Начальному этапу демутации соответствует тип вырубки, который определяется по комплексу лесорастительных условий и признакам растительности, связанной с исходным типом леса (до вырубки) [19, 52].

Для учета динамики в генетической и динамической лесных типологиях предложена гипотеза о многообразии линий сукцессионной динамики лесов в сходных условиях местопроизрастания [13, 42, 71]. В литературу по лесному хозяйству вводятся термины «тип развития», «направления лесовозобновления», «экологический ряд восстановления и развития насаждения», «эколого-динамический ряд», «категория вырубки», «вариант типа вырубки», «тип возобновления», «тип формирования насаждений» [13, 42, 43]. Данные понятия имеют как теоретическое значение – для лесоведения в плане понимания сложности и неоднозначности лесообразовательного процесса; так и практическое – для разработки оптимальных стратегий лесовосстановления.

Для этих целей С.Н. Санников предложил подробную схему дивергенции рядов динамики растительности на примере горных лесов Урала [42, 43]. Наглядно показана зависимость направлений дигрессивно-демутационных сукцессий от вида и интенсивности деструктивного воздействия (пожар, ветровал, рубка), типа почвенного субстрата (ненарушенный, обожженный, механически «минерализованный»), наличия или отсутствия на открытых местообитаниях семян и подростов хвойных древесных растений. Доказывается, что планирование мероприятий по лесовосстановлению с учетом эколого-динамических рядов восстановления и развития биогеоценозов позволяет эффективно использовать восстановительный потенциал лесной экосистемы и существенно сократить экономические затраты и сроки лесовосстановления.

Стадии и фазы восстановительно-возрастной динамики древостоев и критерии их выделения подробно описаны Е.П. Смолоноговым [46] на примере еловых и кедровых лесов Западной Сибири и Урала. В данной работе убедительно показано, что для устойчивого природопользования необходимо учитывать не только особенности типов леса, но и восстановительно-возрастную стадию лесного фитоценоза. Это имеет значение для планирования как рубок ухода, так и выбора технологии лесозаготовок и может помочь избежать нежелательной длительной и устойчивой смены хвойных лесов на лиственные.

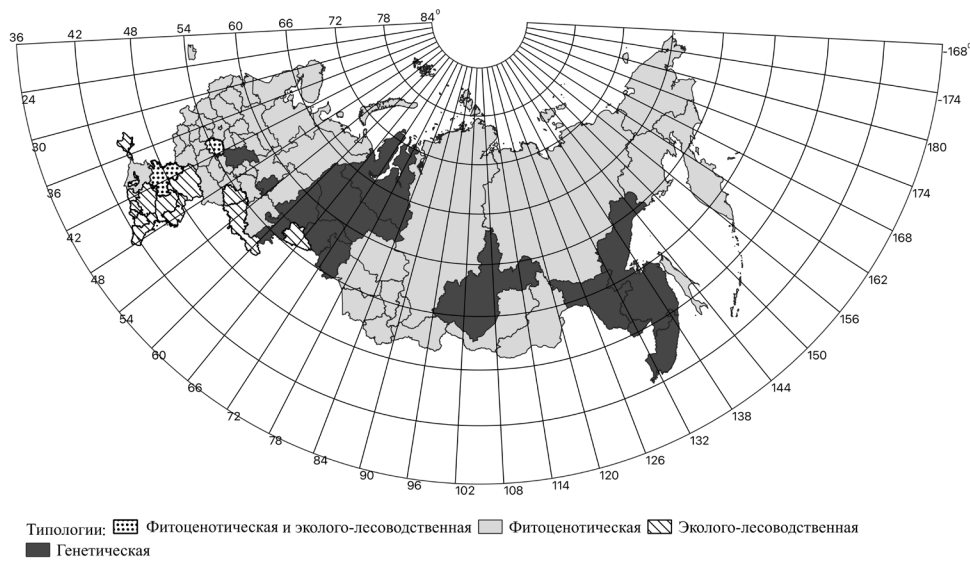
Если генетическая лесная типология сформировалась при изучении сложных и постоянно меняющихся лесов Дальнего Востока [15], то динамическая типология зародилась при классифицировании растительности северных территорий [28, 29], которые отличаются более простой структурой и более четкими зависимостями структуры древостоев от лесорастительных условий. Первоначально типология И.С. Мелехова была направлена на классификацию открытых местообитаний: вырубок и гарей. В ходе исследований ученый показал, что различия растительности на рубках и гарях обуславливают и различия в дальнейшем формировании лесного фитоценоза. Поэтому в число основных диагностических признаков типа рубки или гари включены виды-доминанты травяно-кустарничкового яруса как факторы, определяющие выживание и рост последующего возобновления древесных растений [28, 29]. В этом заключается одно из различий динамической и генетической лесных типологий. В генетической лесной типологии травяно-кустарничковому ярусу уделяется незаслуженно мало внимания. На необходимость более детального учета флористического состава фитоценозов в лесной типологии и использования сильных сторон фитоиндикации для детального экологического анализа, в т. ч. для диагностики лесорастительных условий и стадий дигрессивно-дедуктивных смен, указывают все рассмотренные в статье лесотипологические направления [13, 30, 51, 60, 72, 74]. Можно отметить, что совершенствование региональных классификационных схем типов леса происходит на основе углубленного экологического анализа видовой структуры фитоценозов, их продуктивности и динамики, а также факторов, определяющих разнообразие типов леса. Поэтому, несмотря на изначальные различия лесных типологий, происходит их постепенное сближение.

Следующее различие заключается в том, что в динамической типологии рубки и гари выделяются в разные типы леса, а в генетической они включены в коренной тип леса [10, 13]. При этом связь с коренным типом леса в динамической типологии не всегда прослеживается, потому что один тип рубки или гари может формироваться на месте различных коренных типов леса [28, 29]. В генетической лесной типологии, т. к. тип рубки и гари включен в коренной тип леса, всегда сохраняется связь между ними [13]. В динамической классификации, в отличие от классификации Б.А. Ивашкевича – Б.П. Колесникова, не используется детерминированная схема изменений типов леса. Так как явления конвергенции растительности на рубках и гарях в различных типах леса выражены достаточно сильно и физиономически сходные рубки и гари в различных типах леса требуют совершенно разных лесовосстановительных мероприятий, для устойчивого лесопользования большее значение имеет генетическая лесная типология [13, 75]. В то же время на основе детальных количественных исследований было доказано, что и для коренных лесов явление конвергенции возможно. Так, например, ельники-черничники характеризуются широкой экологической амплитудой, но восстановительные смены протекают по-разному в зависимости от различий в лесорастительных условиях, а сходство выявляется только для коренных лесов [35]. Данный результат исследований имеет принципиальное значение для лесопользования и охраны природы, т. к. эффекты рубок и пожаров в физиономически сходных типах леса (т. е. в пределах одного типа леса фитоценотической классификации, но в различных типах леса – генетической) могут существенно различаться, а это требует внесения корректив в лесопользование.

Несмотря на различия в деталях, учет динамики растительности при ее классифицировании объединяет эти 2 направления лесной типологии, и в настоящее время их уже бывает сложно разделить [10, 13, 19, 26, 74]. В качестве примеров можно привести исследования С.А. Дыренкова [6], В.Н. Федорчука [56], В.Ю. Нешатаева [35] и многих других. Особо следует отметить современную классификацию вырубок [19], которая по принципам составления сходна с генетической типологией. Большой вклад в типологию вырубок внесла и Н.Г. Уланова [52]. Ее подход к классификации растительности объединяет не только динамическую и генетическую типологии, но и подход Ж. Браун-Бланке [52]. Данный пример не является уникальным. Современный электронный определитель типов леса Европейской России также удачно сочетает в себе основные идеи динамической и генетической типологий, эколого-флористической классификации [8]. В динамической типологии, как и в генетической, выделяются этапы лесообразовательного процесса. Так, И.С. Мелехов называет следующие этапы развития леса: этап, предшествующий образованию леса (типы вырубок, гарей); формирование леса; этап сложившегося леса (в спелом возрасте); последующие этапы с возможным переходом в новый тип леса [45]. Б.П. Колесников считал, что разработанная И.С. Мелеховым динамическая классификация типов вырубок и гарей [29] является частным случаем классификации начальных стадий восстановления лесов в ходе их устойчивых смен, поэтому классификацию И.С. Мелехова можно отнести к генетическим [17]. Следует отметить, что современная лесоэкологическая классификация также развивается в направлении учета естественной и антропогенной динамики лесных экосистем [30].

География использования лесотипологических классификаций в Российской Федерации. На рисунке приведена картосхема современного использования лесотипологических классификаций, созданная на основе данных, полученных по официальным запросам в филиалы ФГБУ «Рослесинфорг», изучения лесных планов регионов РФ, а также обзора В.Ю. Нешатаева [34]. Детализации по названиям, характеристикам, авторам и организациям, участвовавшим в разработке лесных типологий, для конкретных регионов СССР и РФ в данной публикации не приведено из-за значительного объема этой информации. Классификацию И.С. Мелехова отдельно не выделяли, а рассматривали ее в качестве продолжения фитоценотической классификации В.Н. Сукачева.

Генетические типологии используются в 13 регионах РФ (Приморский и Хабаровский края, Удмуртская Республика, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа, Амурская, Еврейская, Иркутская, Нижегородская, Омская, Свердловская, Тюменская и Челябинская области). Лесоэкологические (эколого-лесоводственные) типологии применяются в 14 регионах России (Астраханская, Волгоградская, Курганская и Самарская области, Ставропольский край, Республики: Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская, Чеченская, Адыгея, Дагестан, Калмыкия, Ингушетия, Северная Осетия – Алания, Крым). В Ростовской и Рязанской областях используются классификации, которые относятся к фитоценоческому и лесоэкологическому направлениям. В остальных регионах Российской Федерации распространены фитоценотические лесотипологические классификации.



Картосхема, характеризующая географию использования основных лесотипологических классификаций в Российской Федерации

Map chart characterizing the geography of the use of the main forest typological classifications in the Russian Federation

Выводы

1. В процессе развития лесных типологий представление о типе леса изменялось от участка леса, однородного по составу, строению и внешнему облику, в естественных классификациях до представлений о типе леса с приоритетом однородности по происхождению (генезису), процессам развития и динамики по сравнению с однородностью состава и структуры (гомогенностью) в пространстве (генетическая и динамическая типологии).

2. В связи с необходимостью разработки карт растительности различных масштабов и использованием ГИС-технологий в основе всех описанных типологий начинает преобладать географический принцип и происходит сближение изначально разных направлений классификации лесов. В настоящее время во всех подходах к классификации растительности обязательными становятся учет климатических и эдафических факторов, оценка их роли в дифференциации растительности, даже если изначально для выделения единиц растительности (типов леса и других синтаксонов) преимущественно использовались признаки растительности. Тем не менее географический принцип Г.Ф. Морозова реализуется в полной мере только в генетической лесной типологии благодаря разработке системы буквенных и цифровых обозначений для отражения приуроченности типа леса к зоне, подзоне, провинции, высотному поясу, флористическому комплексу биогеоценозов, эдафическому и гидрологическому комплексу лесорастительных условий разного ранга (классы, группы, типы).

3. Учет сукцессионной динамики лесных биогеоценозов становится центральной проблемой во всех современных типологиях. Лучше всего данная проблема проработана в генетической лесной типологии, где в качестве основных диагностических признаков типа леса используются стабильные во времени характеристики лесорастительных условий и вводятся понятия эколого-динамических рядов формирования и развития биогеоценозов.

4. Работы по совершенствованию лесной типологии должны быть направлены, на наш взгляд, на возможность объединения существующих региональных типологий в единую классификацию на основе генетического подхода. Решение проблемы сведения существующих типологий в одну обеспечит уровень лесоустройства, позволяющий оптимизировать лесопользование и сравнивать полученные данные как по субъектам РФ, так и по стране в целом.

5. Проблема учета антропогенных воздействий актуальна для всех рассмотренных типологий и активно обсуждается на уровне теоретических положений. Для практического применения разработаны региональные классификационные схемы типов вырубок и гарей в соответствии с генетической и динамической типологиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Багинский В.Ф. Динамика продуктивности сосновых древостоев белорусского полевья по типам леса в связи с изменением климата // Лесн. типология: современные методы выделения типов леса, классификация и районирование лесной растительности: материалы Междунар. науч. семинара, Минск–Нарочь, 20–21 окт. 2016 г. / НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси. Минск: Колорград, 2016. С. 73–83.

Baginsky V.F. Dynamics of Productivity of Pine Stands of the Belarusian Woodlands by Forest Types in Connection with Climate Change. *Forest Typology: Modern Methods of Forest Types Allocation, Classification, and Zoning of Forest Vegetation: Materials of the International Scientific Seminar* (Minsk-Naroch, October 20–21, 2016). National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Experimental Botany named after V.F. Kuprevich of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk, Kolorgrad Publ., 2016, pp. 73–83. (In Russ.).

2. Горнов А.В. Классификация лесов с использованием определителя типов леса Европейской России (на примере Карелии и Карельского перешейка) // Вопр. лесн. науки. 2018. Т. 1, № 1. С. 1–53.

Gornov A.V. Classification of Forests Using a Field Guide of Forest Types of the European Russia (Evidence from Karelia and the Karelian Isthmus). *Forest Science Issues*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 1–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-53>

3. Громцев А.Н., Кравченко А.В., Курхинен Ю.П., Сазонов С.В. Динамика разнообразия лесных сообществ, флоры и фауны европейской тайги в естественных условиях и после антропогенных воздействий: опыт исследований и обобщения // Тр. КарНЦ РАН. 2010. № 1. С. 16–33.

Gromtsev A.N., Kravchenko A.V., Kurkhinen Yu.P., Sazonov S.V. Dynamics of the Diversity of Forest Communities, Flora and Fauna of the European Taiga in Natural Conditions and after Anthropogenic Impact: Research Experience and Generalization. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series Biogeography*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 16–33. (In Russ.).

4. Денисов С.А. Лесоведение: конспект лекций. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. 168 с.
Denisov S.A. *Forest Science: Lecture Notes*. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University Publ., 2008. 168 p. (In Russ.).

5. Дылис Н.В. Значение идей В.Н. Сукачева в развитии советского лесоведения // Вопр. лесоведения: сб. ст. / отв. ред. акад. А.Б. Жуков; АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева. Красноярск, 1973. Т. 2. С. 5–14.

Dylis N.V. The Significance of V.N. Sukachev's Ideas in the Development of Soviet Forest Science. Collection of articles. *Voprosi Lesovedeniya*, Krasnoyarsk, 1973, vol. 2, pp. 5–14. (In Russ.).

6. Дыренков С.А. О региональных кадастрах типов леса // Лесоведение. 1989. № 2. С. 3–9.

Dyrenkov S.A. On Regional Inventories of Forest Types. *Russian Forest Sciences*, 1989, no. 2, pp. 3–9. (In Russ.).

7. Заугольнова Л.Б. Подходы к оценке типологического разнообразия лесного покрова // Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / отв. ред. А.С. Исаев; Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. М.: Наука, 2008. С. 36–58.

Zaugunova L.B. Approaches to the Assessment of the Biological Diversity of the Forest Cover. Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS. *Monitoring of the Biological Diversity of the Forests of Russia: Methodology and Methods*. Moscow, Nauka Publ., 2008, pp. 36–58. (In Russ.).

8. Заугольнова Л.Б., Мартыненко В.Б. Определитель типов леса Европейской России. Режим доступа: <http://cepl.rssi.ru/bio/forest/index.htm> (дата обращения: 17.04.21).

Zaugunova L.B., Martynenko V.B. *Determinant of Forest Types in European Russia*. (In Russ.).

9. Золотова Е.С. Лесотипологические особенности растительности и почв Зауральской холмисто-предгорной провинции: дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2013. 208 с.

Zolotova E.S. *Typological Features of Vegetation and Soils in Zauralsky Hilly Piedmont Province*: Cand. Biol. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2013. 208 p. (In Russ.).

10. Золотова Е.С., Иванова Н.С. Лесотипологическое исследование вырубок Зауральской холмисто-предгорной провинции // Изв. СамНЦ РАН. 2012. Т. 14, № 1(4). С. 1016–1019.

Zolotova E.S., Ivanova N.S. Forest Typological Study of Felling Areas of the Trans-Ural Hilly-foothill Province. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAS = News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1(4), pp. 1016–1019. (In Russ.).

11. Иванова Н.С. Развитие генетической лесной типологии в России // Современ. наукоемкие технологии. 2010. № 12. С. 94–95.

Ivanova N.S. Development of Genetic Forest Typology in Russia. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, 2010, no. 12, pp. 94–95. (In Russ.).

12. Иванова Н.С. Интернет-ресурс «Генетическая типология и динамика леса» // Фундам. исслед. 2013. № 1(3). С. 576–579.

Ivanova N.S. Internet resource «Genetic typology and forest dynamics». *Fundamental Research*, 2013, no. 1, pp. 576–579. (In Russ.).

13. Иванова Н.С. Лесотипологические особенности биоразнообразия и восстановительно-возрастной динамики растительности горных лесов Южного и Среднего Урала: дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2019. 304 с.

Ivanova N.S. *Forest Typological Features of Biodiversity and Restoration-Age Dynamics of Vegetation of Mountain Forests of the Southern and Middle Urals*: Doc. Biol. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2019. 304 p. (In Russ.).

14. Ивашкевич Б.А. Типы лесов Приморья и их экономическое значение // Производительные Силы Дальнего Востока. Вып. 3: Растит. мир. Хабаровск; Владивосток: Книж. дело, 1927. С. 3–20.

Ivashkevich B.A. Types of Forests of Primorye and their Economic Significance. *Productive Forces of the Far East*. The Plant World. Khabarovsk, Vladivostok, Knizhnoye Delo Publ., 1927, iss. 3, pp. 3–20. (In Russ.).

15. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока. Тр. Дальневост. фил. им. В.Л. Комарова. Сер.: Ботаника. М.; Л.: АН СССР, 1956. Т. 2(4). 262 с.

Kolesnikov V.P. *Cedar Forests of the Far East*. Proceedings of the Far Eastern branch named after Komarov V.L. Botanical series, Moscow, Leningrad, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1956, vol. 2. iss.4. 262 p. (In Russ.).

16. Колесников Б.П. Генетическая классификация типов леса и ее задачи на Урале // Вопросы классификации растительности: сб. ст. / отв. ред. проф. П.Л. Горчаковский. Тр. Ин-та биологии Урал. фил. АН СССР. Свердловск, 1961. Вып. 27. С. 47–59.

Kolesnikov V.P. Genetic Classification of Forest Types and its Tasks in the Urals. *Proceedings of the Institute of Biology of the Ural Branch of the USSR Academy of Sciences*, Sverdlovsk, 1961, vol. 27, pp. 47–59. (In Russ.).

17. Колесников Б.П. Генетический этап в лесной типологии и его задачи // Лесоведение. 1974. № 2. С. 3–20.

Kolesnikov V.P. The Genetic Stage in the Forest Typology and its Tasks. *Russian Forest Sciences*, 1974, no. 2, pp. 3–20. (In Russ.).

18. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области: практ. рук. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

Kolesnikov V.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Forest Vegetation Conditions and Forest Types of the Sverdlovsk Region*. Sverdlovsk, Academy of science of the USSR Publ., 1973. 176 p. (In Russ.).

19. Крышень А.М. Растительные сообщества вырубок: структура, динамика и классификация (на примере Карелии): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Петрозаводск, 2005. 42 с.

Kryshen A.M. *Plant Communities of Cuttings: Structure, Dynamics and Classification (On The Example Of Karelia)*: Doc. Biol. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2005. 42 p. (In Russ.).

20. Крюденер А.А. Основы классификаций типов насаждений и их народохозяйственное значение в обиходе страны. Петроград, 1917. 318 с.

Krudener A.A. *Fundamentals of Classifications of Planting Types and Their National Economic Significance in the Everyday Life of The Country*. Petrograd, 1917. 318 p. (In Russ.).

21. Кузьменко Е.И. Эколого-географические подходы комплексного изучения и картографирования геосистем таежных регионов Сибири: дис. ... д-ра геогр. наук. Иркутск, 2019. 352 с.

Kuzmenko E.I. *Ecological and Geographical Approaches of Complex Study and Mapping of Geosystems of Taiga Regions of Siberia*: Doc. Geogr. Sci. Diss. Irkutsk, 2019. 352 p. (In Russ.).

22. Кузьменко Е.И., Смолоногов Е.П. Лесные экосистемы средней и южной тайги Западно-Сибирской равнины (структура и пространственно-временная динамика). Новосибирск: СО РАН, 2000. 218 с.

Kuzmenko E.I., Smolonogov E.P. *Forest Ecosystems of the Middle and Southern Taiga of the West Siberian Plain (Structure and Spatial-Temporal Dynamics)*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2000. 218 p. (In Russ.).

23. Курнаев С.Ф. Основные типы боровых сосняков южной тайги Ярославской области // Сосновые боры подзоны южной тайги и пути ведения в них лесного хозяйства. М.: Наука, 1969. С. 11–64.

Kurnaev S.F. The Main Types of Pine Forests in The Southern Taiga of the Yaroslavl Region. *Pine Forests of the Southern Taiga Subzone and Ways of Introducing Forestry into them*. Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 11–64. (In Russ.).

24. Луганский Н.А., Залесов С.В., Луганский В.Н. Лесоведение. 2-е изд., перераб. / УГЛУТУ. Екатеринбург, 2010. 432 с.

Lugansky N.A., Zalesov S.V., Lugansky V.N. *Forestry Science: Training Manual*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2010. 432 p. (In Russ.).

25. Манько Ю.И. Возникновение и становление генетической лесной типологии // Лесоведение. 2013. № 6. С. 40–55.

Manko Yu.I. The Emergence and Formation of Genetic Forest Typology. *Russian Forest Sciences*, 2013, no. 6, pp. 40–55. (In Russ.).

26. Мартыненко В.Б., Широких П.С., Миркин В.М., Наумова Л.Г., Байшева Э.З., Мулдашев А.А. Синтаксономический анализ влияния инициальной стадии на вторичную автогенную сукцессию широколиственного леса // Журн. общ. биол. 2016. Т. 77, № 4. С. 303–313.

Martynenko V.B., Shirokikh P.S., Mirkin V.M., Naumova L.G., Bayisheva E.Z., Muldashev A.A. A Syntaxonomic Analysis of Initial Stage Effect on Secondary Autogenous Succession of Broad-Leaved Forest. *Biology Bulletin Reviews*, 2016, vol. 77, no 4, pp. 303–313. (In Russ.).

27. Маслов А.А. Характеристики типов леса в условиях изменения климата // Лесная типология: современные методы выделения типов леса, классификация и районирование лесной растительности: материалы Междунар. науч. семинара, Минск–Нарочь, 20–21 окт. 2016 г. / НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси. Минск: Колорград, 2016. С. 107–108.

Maslov A.A. Characteristics of Forest Types in the Context of Climate Change. *Forest Typology: Modern Methods of Identifying Forest Types, Classification and Zoning of Forest Vegetation: Proceedings of the International Scientific Seminar. Minsk, Naroch, October 20–21, 2016*. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Experimental Botany named after V.F. Kuprevich of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk, Kolorgrad Publ., 2016, pp. 107–108. (In Russ.).

28. Мелехов И.С. Основы типологии вырубок // Основы типологии вырубок и ее значение в лесном хозяйстве: сб. ст. / АН СССР. Ин-т леса и лесохимии; под ред. акад. ВАСХНИЛ И.С. Мелехова. Архангельск, 1959. С. 5–34.

Melekhov I.S. Basics of Felling Typology. *Foundations of Felling Typology and its Significance in Forestry*. Arkhangelsk, 1959, pp. 5–34. (In Russ.).

29. Мелехов И.С. К классификации растительного покрова в связи с концентрированными рубками // Вопросы классификации растительности: сб. ст. / отв. ред. проф. П.Л. Горчаковский. Свердловск. Тр. Ин-та биологии Урал. фил. АН СССР; 1961. Вып. 27. С. 139–145.

Melekhov I.S. On the Classification of Vegetation Cover in Connection with Concentrated Logging. *Proceedings of the Institute of Biology, Sverdlovsk*, 1961, vol. 27, pp. 139–145. (In Russ.).

30. Мигунова Е.С. Лесная типология Г.Ф. Морозова – А.А. Крюденера – П.С. Погребняка – теоретическая основа лесоводства // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 5. С. 52–63.

Migunova E.S. Forest Typology of G.F. Morozov – A.A. Kryudener – P.S. Pogrebnyak – the Theoretical Basis of Forestry. *Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 52–63. (In Russ.).

31. Морозов Г.Ф. Учение о лесе. Л.: Гос. изд-во, 1925. 367 с.

Morozov G.F. *The Doctrine of Forest Types*. Leningrad, State Publishing House, 1925. 367 p. (In Russ.).

32. Морозова О.В., Заугольнова Л.Б., Исаева Л.Г., Костина В.А. Классификация бореальных лесов севера Европейской России. I. Олиготрофные хвойные леса // Растительность России. 2008. № 13. С. 61–81.

Morozova O.V., Zaugolnova L.B., Isaeva L.G., Kostina V.A. Classification of Boreal Forests of the North of European Russia. I. Oligotrophic Coniferous Forests. *Vegetation of Russia*, 2008, no. 13, pp. 61–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/vegus/2008.13.61>

33. Назимова Д.И., Гуревич М.Ю., Кофман Г.Б., Андреева Н.М. Опыт многомерной классификации лесорастительных районов Сибири по климатическим признакам // География и природ. ресурсы. 1997. № 2. С. 134–142.

Nazimova D.I., Gurevich M.Yu., Kofman G.B., Andreeva N.M. Experience of Multidimensional Classification of Forest-growing Areas of Siberia by Climatic Characteristics. *Geography and Natural Resources*, 1997, no. 2, pp. 134–142. (In Russ.).

34. Нешатаев В.Ю. Лесная типология в России: история и современные проблемы // Лесная типология: современные методы выделения типов леса, классификация и районирование лесной растительности: материалы Междунар. науч. семинара, Минск–Нарочь, 20–21 окт. 2016 г. / НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси. Минск: Колорград, 2016. С. 13–27.

Neshataev V.Yu. Forest Typology in Russia: History and Modern Problems. *Forest Typology: Modern Methods of Forest Types Allocation, Classification and Zoning of Forest Vegetation: Materials of the International Scientific Seminar. Minsk, Naroch, October 20–21, 2016*. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Experimental Botany named after V.F. Kuprevich of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk, Kolorgrad Publ., 2016, pp. 13–27. (In Russ.).

35. Нешатаев В.Ю. Антропогенная динамика таежной растительности Европейской России: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2017. 43 с.

Neshataev V.Yu. *Anthropogenic Dynamics of Taiga Vegetation in European Russia: Doc. Biol. Sci. Abs. Saint-Petersburg State Forest Engineering University*, 2017. 43 p. (In Russ.).

36. Орлов А.Я., Кошельков С.П., Осипов В.В., Соколов А.А. Типы лесных биогеоценозов южной тайги. М.: Наука, 1974. 232 с.

Orlov A.Ya., Koshelkov S.P., Osipov V.V., Sokolov A.A. Types of Forest Biogeocenoses of the Southern Taiga. Moscow, Nauka Publ., 1974. 232 p. (In Russ.).

37. Погребняк П.С. Основы лесной типологии. 2-е изд., испр. и доп. Киев: АН Украинской ССР, 1955. 456 с.

Pogrebnyak P.S. *Fundamentals of Forest Typology*. Kiev, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Publ., 1955. 456 p. (In Russ.).

38. Рысин Л.П. Есть ли будущее у лесной типологии в России? // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Петрозаводск, 30 сент. – 3 окт. 2009 г. / редкол.: В.И. Крутов и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 8–10.

Rysin L.P. Is There a Future for Forest Typology in Russia? *Materials of the All-Russian Scientific Conference with International Participation "Forest Resources of the Taiga Zone of Russia: Problems of Forest Management and Reforestation"*. Petrozavodsk, September 30 – October 3, 2009, Karelian Research Centre of RAS, 2009, pp. 8–10. (In Russ.).

39. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Еловые леса России. М.: Наука, 2002. 336 с.

Rysin L.P., Savelyeva L.I. *Spruce Forests of Russia*. Moscow, Nauka Publ., 2002. 336 p. (In Russ.).

40. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Кадастры типов леса и типов лесных биогеоценозов. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2007. 144 с.

Rysin L.P., Savelyeva L.I. *Cadastr of Forest Types and Types of Forest Biogeocenoses*. Moscow, Comradship of Scientific Publ., КМК, 2007. 144 p. (In Russ.).

41. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Сосновые леса России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2008. 289 с.

Rysin L.P., Savelyeva L.I. *Pine forests of Russia*. Moscow, Comradship of Scientific Publ., 2008. 289 p. (In Russ.).

42. Санников С.Н. Дивергенция, конвергенция и наследование структуры лесных биогеоценозов // Генетическая типология, динамика и география лесов России: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию со дня рождения Б.П. Колесникова, Екатеринбург, 21–24 июля 2009 г. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. С. 56–61.

Sannikov S.N. Divergence, Convergence, and Inheritance of the Structure of Forest Biogeocenoses. *Genetic Typology, Dynamics, and Geography of Russian Forests*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009, pp. 56–61. (In Russ.).

43. Санныков С.Н. Эколого-генетическая классификация типов леса на основе экодинамических рядов развития биогеоценозов // Сиб. лесн. журн. 2019. № 1. С. 3–15.

Sannikov S.N. Ecological and Genetic Classification of Forest Types on the Basis of Dynamic Series of Biogeocenosis Development. *Siberian Forest Journal*, 2019, no. 1, pp. 3–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20190101>

44. Седых В.Н. Ландшафтно-типологическая основа для проведения лесоустройства на территории Сибири // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. Т. 34(1), вып. 1. С. 70–77.

Sedykh V.N. Landscape-typological Basis for Conducting Forest Management on the Territory of Siberia. *Forest Taxation and Forest Management*, 2005, vol. 34(1), iss. 1, pp. 70–77. (In Russ.).

45. Сеннов С.Н., Грязькин А.В. Лесоведение. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 156 с.

Sennov S.N., Gryazkin A.V. *Forest Science: a Textbook*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2006. 156 p. (In Russ.).

46. Смолоногов Е.П. Эколого-географическая дифференциация и динамика кедровых лесов Урала и Западно-Сибирской равнины (эколого-лесоводственные основы оптимизации хозяйства). Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 288 с.

Smolonogov E.P. Ecological and Geographical Differentiation and Dynamics of Cedar Forests of the Urals and the West Siberian Plain (Ecological and Forestry Bases of Optimization of the Economy). Sverdlovsk, Ural Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).

47. Смолоногов Е.П. Основные положения генетического подхода при построении лесотипологических классификаций // Экология. 1998. № 4. С. 256–261.

Smolonogov E.P. Main Principles of the Genetic Approach to the Typological Classification of Forests. *Ecology*, 1998, no. 4, pp. 256–261. (In Russ.).

48. Смолоногов Е.П. Некоторые аспекты теории лесной типологии // Изв. вузов. Лесн. журн. 1999. № 1. С. 13–17.

Smolonogov E.P. Some Aspects of Forest Typology. *Lesnoy Zhurnal = Forestry Journal*, 1999, no. 1, pp. 13–17. (In Russ.).

49. Сукачев В.Н. Развитие лесной типологии в СССР за 40 лет // Достижения науки в лесн. хоз-ве за 40 лет / Ин-т леса АН СССР. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1957. С. 5–16.

Sukachev V.N. Development of Forest Typology in the USSR for 40 Years. *Achievements of Science in Forestry for 40 Years*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1957, pp. 5–16. (In Russ.).

50. Сукачев В.Н. Избр. тр.: в 3-х т. Т. 1: Основы лесной типологии и лесной биогеоценологии / под ред. Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1972. 419 с.

Sukachev V.N. Selected works. In 3 volumes. *Fundamentals of Forest Typology and Forest Biogeocenology*. Leningrad, Nauka Publ., 1972, vol. 1. 419 p. (In Russ.).

51. Уланова Н.Г. Восстановительная динамика растительности сплошных вырубок и массовых ветровалов в ельниках южной тайги (на примере европейской части России): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2006. 46 с.

Ulanova N.G. *Restorative Dynamics of Vegetation of Clear-Cut Areas and Massive Windblows in the Spruce Forests of the Southern Taiga (In the European Part of European Russia)*: Doc. Biol. Sci. Abs. Moscow, MSU Publ., 2006. 46 p. (In Russ.).

52. Уланова Н.Г. Синтез классификации растительности вырубок в еловых лесах южной тайги с позиций И.С. Мелехова, В.Н. Сукачева, Б.П. Колесникова и Ж. Браун-Бланке // Генетическая типология, динамика и география лесов России: докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию со дня рождения Б.П. Колесникова, Екатеринбург, 21–24 июля 2009 г. Екатеринбург: Ботан. сад УРО РАН, 2009. С. 72–75.

Ulanova N.G. Synthesis of Classification of Cutting Vegetation in Spruce Forests of the Southern Taiga from the Positions of I.S. Melekhov, V.N. Sukachev, B.P. Kolesnikov and Zh. Brown-Blanke. *Genetic Typology, Dynamics and Geography of Russian Forests. Reports of the All-Russian Scientific Conference with International Participation dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of B. P. Kolesnikov (Yekaterinburg, July 21–24, 2009)*. Yekaterinburg, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 72–75. (In Russ.).

53. Фарбер С.К. Структуризация лесных сообществ // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 35–49.

Farber S.K. Structuring of Forest Communities. *Siberian Journal of Forest Science*, 2014, no. 1, pp. 35–49. (In Russ.).

54. Фарбер С.К., Кошкарова В.Л., Кузьмик Н.С. Картографирование лесных формаций голоцена с использованием основных показателей климата – тепла и влаги // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 26–40.

Farber S.K., Koshkarova V.L., Kuzmik N.S. Mapping of Holocene Forest Formations Using Basic Climate Indicators-Heat and Moisture. *Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 26–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170602>

55. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С. Лесная типология: теория и перспективы использования в лесах Сибири // Хвойные бореал. зоны. 2013. Т. 30, № 1-2. С. 143–148.

Farber S.K., Kuzmik N.S. Forest Typology: Theory and Prospects of the Use in the Forests of Siberia. *Coniferous Boreal Zones*, 2013, vol. 30, no. 1–2, pp. 143–148. (In Russ.).

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

Fedorchuk V.N., Neshataev V.Yu., Kuznetsova M.L. *Forest Ecosystems of the North-Western Regions of Russia: Typology, Dynamics, Economic Features*. Saint Petersburg, SPbFRI Publ., 2005. 382 p. (In Russ.).

57. Фильрозе Е.М. Схема генетической классификации типов леса тайги восточного макросклона Южного Урала и северной лесостепи восточно-уральского пенепплена // Типы и динамика лесов Урала и Зауралья. Сер.: Тр. Ин-та экологии растений и животных. Вып. 53. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1967. С. 119–155.

Filrose E.M. Genetic Classification Scheme of Taiga Forest Types of the Eastern Macroslope of the Southern Urals and the Northern Forest-Steppe of the East Ural Penepplain. *Types and Dynamics of Forests in the Urals and Trans-Urals*. Sverdlovsk, Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences Publ., 1967, pp. 119–155. (In Russ.).

58. Фильрозе Е.М. Схема генетической классификации типов леса Южного Урала // Эколого-географ. и генетич. принципы изучения лесов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 53–60.

Filrose E.M. Scheme of Genetic Classification of Forest Types in the Southern Urals. *Ecological-Geographical and Genetic Principles of Forest Research*. Sverdlovsk, Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences Publ., 1983, pp. 53–60. (In Russ.).

59. Фомин В.В., Залесов С.В. Географо-генетический подход к оценке и прогнозированию лесных ресурсов с использованием ГИС-технологий // Аграр. вестн. Урала. 2013. Т. 118, № 12(118). С. 18–24.

Fomin V.V., Zalesov S.V. Geographical and Genetic Approach to the Assessment and Forecasting of Forest Resources Using GIS Technologies. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2013, vol. 118, no. 12, pp. 18–24. (In Russ.).

60. Ханина Л.Г. Классификация типов лесорастительных условий по индикаторным видам Воробьева–Погребняка: база данных и опыт анализа лесотаксационных данных // Вопр. лесн. науки. 2019. Т. 2, № 4. С. 1–30.

Khanina L.G. Classification of Types of Forest Growing Conditions by Indicator Species of Vorobyov-Pogrebnyak: Database and Experience of Analysis of Forest Taxational Data. *Forest Science Issues*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 1–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-28>

61. Широких П.С., Мартыненко В.Б., Кунафин А.М., Миркин Б.М. Особенности флористического состава некоторых типов вторичных лесов Южно-Уральского региона // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд.: Биологич. 2012. Т. 117, № 2. С. 43–55.

Shirokikh P.S., Martynenko V.B., Kunafin A.M., Mirkin B.M. Features of the Floristic Composition of Some Types of Secondary Forests of the South Ural Region. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series*, 2012, vol. 117, no. 2, pp. 43–55. (In Russ.).

62. Barbati A., Corona P., Marchetti M. *European Forest types — European Environment Agency. EEA Technical report No 9/2006*. Copenhagen, 2007. Available at: https://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2006_9 (accessed 17.04.21).

63. Barbati A., Marchetti M., Chirici G., Corona P. European Forest Types and Forest Europe SFM indicators: Tools for Monitoring Progress on Forest Biodiversity Conservation. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 321, pp. 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.004>

64. Brand D.G. Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Forest: Progress to Date and Future Directions. *Biomass and Bioenergy*, 1997, vol. 13, no. 4–5, pp. 247–253. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10012-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10012-5)

65. Castañeda F. Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management: International Processes, Current Status and the Way Ahead. *Unasylva*, 2000, vol. 51(203), pp. 34–40.

66. DeLong S.C., Griesbauer H., Mackenzie W., Foord V. Corroboration of Biogeoclimatic Ecosystem Classification Climate Zonation by Spatially Modelled Climate Data. *BC Journal of Ecosystems and Management*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 49–64. <https://doi.org/10.22230/jem.2010v10n3a441>

67. Fomin V.V., Zalesov S.V., Popov A.S., Mikhailovich A.P. Historical Avenues of Research in Russian Forest Typology: Ecological, Phytocoenotic, Genetic, and Dynamic Classifications. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 47, no. 7, pp. 849–860. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0011>

68. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic Forest Typology as a Scientific and Methodological Basis for Environmental Studies and Forest Management. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 609, art. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012044>

69. Fomin V., Mikhailovich A., Golikov D., Agapitov E. Reconstruction of the Expansion of Siberian Larch into the Mountain Tundra in the Polar Urals in the 20th – Early 21st Centuries. *Forests*, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 419–431. <https://doi.org/10.3390/f13030419>

70. Fomin V., Mikhailovich A., Zalesov S., Popov A., Terekhov G. Development of Ideas within the Framework of the Genetic Approach to the Classification of Forest Types. *Baltic Forestry*, 2021, vol. 27, no. 1 (466), pp. 1–14. <https://doi.org/10.46490/BF466>

71. Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of Forest Ecological Classification in Assessment of Vegetation Dynamics. *Sustainability*, 2022, vol. 14, 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>

72. Ivanova N., Petrova I. Species Abundance Distributions: Investigation of Adaptation Mechanisms of Plant Communities. *E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations” (FARBA 2021)*, 2021, vol. 254, no. 02003. 6 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125402003>

73. Ivanova N., Petrova I. Age Structure of Coniferous Saplings in Mountain Old-Growth Forest of The Middle Urals. *E3S Web of Conferences. Actual Problems of*

Ecology and Environmental Management (APM 2021), 2021, vol. 265, no. 01024. 5 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126501024>

74. Ivanova N.S., Zolotova E.S. Development of Forest Typology in Russia. *International Journal of Bio–resource and Stress Management*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 298–303. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2014.00572.7>

75. Ivanova N., Zolotova E. Influence of Logging on Plant Species Diversity in Mountain Forests of the Middle Urals. *AIP Conference Proceedings. Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials (MOSM2020): Proceedings of the IV International Conference*, 2021, no. 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0068389>

76. Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. Influence of Soil Moisture Regime on the Species Biomass of the Herb Layer of Pine Forests in the Ural Mountains. *Ecological Questions*, 2020, vol. 32, no. 2, pp. 27–38. <https://doi.org/10.12775/EQ.2021.011>

77. MacKenzie W.H., Mahony C.R. An Ecological Approach to Climate Change-Informed Tree Species Selection for Reforestation. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 481, art. 118705. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118705>

78. Nazimova D.I., Tsaregorodtsev V.G., Andreyeva N.M. Forest Vegetation Zones of Southern Siberia and Current Climate Change. *Geography and Natural Resources*, 2010, vol. 31, no. 2, pp. 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2010.06.006>

79. Nazimova D.I., Ponomarev E.I., Konovalova M.E. Role of an Altitudinal Zonal Basis and Remote Sensing Data in the Sustainable Management of Mountain Forests. *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, vol. 13, pp. 742–753. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070070>

80. Nelson H.W., Williamson T.B., Macaulay C., Mahony C. Assessing the Potential for Forest Management Practitioner Participation in Climate Change Adaptation. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 360, pp. 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.038>

81. *The Montréal Process. Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests*, 2015. Available at: <http://www.montréalexpress.org/documents/publications/techreports/MontrealProcessSeptember2015.pdf> (accessed 03.11.16).

82. *The Pan-European Forest Process. Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management*, 1993. Available at: <http://www.fao.org/docrep/004/AC135E/ac135e09.htm> (accessed 03.11.16).

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

Научная статья

УДК 630*232.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-31-43

Надземная фитомасса древостоя в экспериментальных культурах сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми

Т.А. Пристова[✉], канд. биол. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [P-9788-2015](https://orcid.org/0000-0002-8266-8113).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8266-8113>

А.Л. Федорков, д-р биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [C-8811-2009](https://orcid.org/0000-0001-7800-7534).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7800-7534>

А.Б. Новаковский, канд. биол. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [P-9739-2015](https://orcid.org/0000-0003-4105-7436).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4105-7436>

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

Поступила в редакцию 09.06.21 / Одобрена после рецензирования 14.09.21 / Принята к печати 17.09.21

Аннотация. Цель настоящей работы – оценка и сравнительный анализ надземной фитомассы сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в экспериментальных культурах. Приведены результаты исследований экспериментальных культур сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми. Культуры заложены посадкой 2-летних сеянцев весной 2006 г. на сосновой вырубке 2004 г. площадью 1 га. В качестве контроля использованы сеянцы сосны местного происхождения. С помощью метода модельных деревьев проведена оценка надземной фитомассы обеих пород. Определены показатели влажности и содержания абсолютно сухого вещества компонентов фитомассы. Для большинства фракций фитомассы сосны скрученной содержание сухого вещества выше, чем у сосны обыкновенной. Масса модельных деревьев сосны обыкновенной в абсолютно сухом состоянии составляет от 3 до 17 кг, сосны скрученной – от 4 до 27 кг в зависимости от диаметра. Проведен регрессионный анализ данных по модельным деревьям. Показано, что для расчета общей надземной фитомассы и массы большинства ее фракций может быть использовано аллометрическое (степенное) уравнение. Исключение составляет масса сухих ветвей, для которых аллометрическая зависимость от диаметра ствола не обнаружена. Фитомасса в свежесрубленном состоянии составляет для сосны обыкновенной 21 т/га, для сосны скрученной – 32 т/га, в абсолютно сухом состоянии – 8,1 и 12,5 т/га соответственно. Структура надземной фитомассы исследуемых пород довольно схожа, за исключением хвои, доля участия которой у сосны скрученной выше, чем у сосны обыкновенной. Вес почти всех компонентов фитомассы сосны скрученной, кроме сухих сучьев, на 20–50 % выше по сравнению с сосной обыкновенной. Общая надземная фитомасса сосны скрученной в культурах при густоте посадки 2,5 тыс. шт./га в 1,5 раза превышает показатель для сосны обыкновенной. Полученные результаты необходимы для пополнения базы данных о продуктивности и в перспективе для оценки депонирования углерода искусственными насаждениями.

Ключевые слова: сосна скрученная, искусственные насаждения, надземная фитомасса, компоненты фитомассы, регрессионный анализ, Республика Коми

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и

антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России», № 122040100031-8.

Для цитирования: Пристова Т.А., Федорков А.Л., Новаковский А.Б. Надземная фитомасса древостоя в экспериментальных культурах сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 31–43. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-31-43>

Original article

Aboveground Stand Phytomass in Experimental Cultures of Lodgepole Pine in Syktvykar Forestry of the Komi Republic

Tatiana A. Pristova[✉], Candidate of Biology, Research Scientist; ResearcherID: [P-9788-2015](https://orcid.org/0000-0002-8266-8113), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8266-8113>

Aleksey L. Fedorkov, Doctor of Biology, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [C-8811-2009](https://orcid.org/0000-0001-7800-7534), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7800-7534>

Alexander B. Novakovsky, Candidate of Biology, Research Scientist;

ResearcherID: [P-9739-2015](https://orcid.org/0000-0003-4105-7436), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4105-7436>

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, Syktvykar, 167982, Russian Federation; pristova@ib.komisc.ru[✉], fedorkov@ib.komisc.ru, novakovsky@ib.komisc.ru

Received on June 9, 2021 / Approved after reviewing on September 14, 2021 / Accepted on September 17, 2021

Abstract. The purpose of this work is to evaluate and comparatively analyze the above ground phytomass of lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in experimental cultures. The results of studies of experimental cultures of lodgepole pine in Syktvykar forestry of the Komi Republic are presented. The cultures were established by planting 2-year-old seedlings in spring 2006 on a pine clear-cut in 2004 with the area of 1 ha. Pine seedlings of local origin were used for control. The aboveground phytomass of both species was assessed using the model tree method. Moisture content and absolute dry matter content of phytomass components were determined. For the majority of phytomass fractions of lodgepole pine the dry matter content is higher than that of common pine. The weight of model trees of Scots pine in absolutely dry state ranges from 3 to 17 kg, lodgepole pine – from 4 to 27 kg depending on the diameter. Regression analysis of data on model trees was carried out. It is shown that the allometric (steppe) equation can be used to calculate the total aboveground phytomass and the mass of most of its fractions. The exception is the mass of dry branches, for which allometric dependence on trunk diameter was not found. The weight of phytomass in freshly cut condition is 21 t/ha for Scots pine, 32 t/ha for lodgepole pine, and 8.1 and 12.5 t/ha in absolutely dry condition, respectively. The structure of aboveground phytomass of the studied species is quite similar, except for needles, the share of which is higher in lodgepole pine than in Scots pine. The weight of almost all components of lodgepole pine phytomass, except for dry twigs, is 20–50 % higher compared to Scots pine. The total aboveground phytomass of lodgepole pine in cultures at a planting density of 2.5 t/ha is 1.5 times higher than that of Scots pine. The obtained results are necessary for replenishment of the database on productivity and in the future for estimation of carbon deposition by artificial plantations.

Keywords: lodgepole pine, forest plantations, aboveground phytomass, phytomass components, regression analysis, Komi Republic

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment on the theme “Zonal regularities of dynamics of structure and productivity of primary and anthropogenically modified phytocenoses of forest and bog ecosystems of the European North-East of Russia”, No. 122040100031-8.

For citation: Pristova T.A., Fedorkov A.L., Novakovskiy A.B. Aboveground Stand Phytomass in Experimental Cultures of Lodgepole Pine in Syktyvkar Forestry of the Komi Republic. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 31–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-31-43>

Введение

Важнейшей задачей лесного хозяйства является восстановление хвойных насаждений после рубок. Внедряемая в настоящее время модель интенсивного использования и воспроизводства лесов предусматривает ускоренное выращивание древесины, в т. ч. за счет введения быстрорастущих древесных пород. Одной из таких пород для таежной зоны России является сосна скрученная (*Pinus contorta* Dougl.) [9]. Естественный ареал сосны скрученной находится в западной части Северной Америки. По физико-механическим свойствам ее древесина близка к древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и используется в основном для производства пиломатериалов и целлюлозы [18]. Первые попытки интродукции сосны скрученной в Европе были предприняты в XIX в. [8]. Масштабная интродукция начата во 2-й половине XX в. в Швеции, где к настоящему времени создано 675 тыс. га чистых и смешанных искусственных насаждений этой породы [7, 25]. В Республике Коми в 2004–2007 гг. заложена серия экспериментальных культур сосны скрученной [16]. На севере европейской части России проведено изучение эколого-биологических особенностей и роста сосны скрученной [5, 11, 17]. В целом исследования, выполненные как в Фенноскандии, так и в таежной зоне европейской части России, показали, что сосна скрученная превосходит сосну обыкновенную по скорости роста [6, 11, 17, 21, 23, 27, 28]. В отечественной литературе мы не обнаружили данных по оценке фитомассы сосны скрученной. Цель – оценка и сравнительный анализ надземной фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в экспериментальных культурах сосны скрученной в 34-м квартале Краснозатонского участкового лесничества Сыктывкарского лесничества Республики Коми (61°40′ с. ш. 51°03′ в. д., 132 м над ур. м.). Категория лесокультурной площади – вырубка на месте сосняка бруснично-лишайникового 2004 г. Подготовка почвы проведена тракторным клином ТК-1 летом 2005 г. Посадка 2-летних сеянцев с закрытой корневой системой выполнена весной 2006 г., площадь участка – 1,0 га, почва – иллювиально-железистая подзолистая, общее количество сеянцев – 2531 шт. Исходный семенной материал сосны скрученной получен с 6 лесосеменных плантаций, созданных по географическому принципу в Швеции семенными потомствами плюсовых деревьев, отобранных в Канаде. В качестве контроля взяты сеянцы сосны обыкновенной местного происхождения. Посадочный материал обеих пород выращивался в полиэтиленовой теплице в одинаковых условиях.

На лесокультурной площади сеянцы высажены в линейные (рядовые) делянки, расположенные рандомизированно в 3-кратной повторности. Из 6 происхождений сосны скрученной для исследования было выбрано самое северное, показавшее лучшие рост и сохранность [23].

В год проведения работ на участке насчитывалось 36 видов сосудистых растений, в т. ч. 8 видов деревьев, 7 – кустарников и кустарничков, 16 – трав, 5 – мхов, а также 3 вида лишайников. Из древесно-кустарниковых пород произрастали *Betula pendula* Roth., *B. pubescens* Ehrh. и единичные экземпляры *Salix caprea* L., *Sorbus aucuparia* L., *Populus tremula* L. и *Picea obovata* Ledeb., имеющие семенное происхождение.

Общее проективное покрытие растений напочвенного покрова на участке составляло в среднем 90 %, варьируя от 60 до 100 %. Мхи занимали в среднем 55 % от общего проективного покрытия, при этом доминировали *Polytrichum commune* Hedw., *Pleurozium schreberi* (Willd ex Brid.) Mitt., *Dicranum polysetum* Sw. Превалирование мхов в живом напочвенном покрове связано с особенностью микрорельефа на участке: сочетание рядов с посадками сосны и междурядий (понижения). В междурядьях наблюдались более влажные условия, которые способствовали развитию мохового покрова. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса в среднем составляло 45 %, варьируя от 15 до 80 %. Основная роль в данном ярусе принадлежала кустарничкам, их проективное покрытие достигало 55 % от общего, в среднем равняясь 30 %, с доминирующим положением *Vaccinium vitis-idaea* L. Среди трав были наиболее распространены *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth., *Chamerion angustifolium* (L.) Scop., *Luzula pilosa* (L.) Willd., *Agrostis gigantea* Roth. Папоротники, плауны и лишайники в живом напочвенном покрове встречались редко или единично (менее 1 %).

Для определения запасов фитомассы в экспериментальных культурах использован метод модельных деревьев [2, 12, 13, 26]. Отбор моделей пропорционально представительству, по одному среднему из каждой ступени толщины, является наиболее надежным [2]. Взятие 10 моделей на пробной площади сосновых культур обеспечивает достаточно точное выравнивание методом наименьших квадратов [14]. На 6 рядовых делянках проведен пересчет деревьев по 2-сантиметровым ступеням тощины (182 дерева сосны скрученной и 103 дерева сосны обыкновенной). В средней ступени толщины брали по две модели, в ступенях толщины 4, 8 и 10 см – по одной. Отобрано и проанализировано 10 модельных деревьев, в т. ч. 5 деревьев сосны скрученной и 5 – сосны обыкновенной. Отбор модельных деревьев для определения фитомассы произведен следующим образом: дерево спиливали на уровне корневой шейки, затем фиксировали его общую длину, диаметр ствола, расстояние от среза до 1-й сухой и 1-й живой ветвей, протяженность кроны [13]. После этого с дерева обрубали все ветви и взвешивали их вместе с хвоей, при этом с каждой части кроны отбирали по 2 ветви для последующих измерений. Ствол разделяли на 3–4 части в зависимости от высоты, взвешивали и от каждой его части выпиливали кружки для установления влажности. Образцы фракции фитомассы каждого модельного дерева высушивали при температуре 105 °С до абсолютно сухого состояния [13].

Регрессионные модели строили на основе аллометрического (степенного) уравнения [8] вида $y = ad^b$ (где y – абсолютно сухой вес дерева или его фракции, кг; d – диаметр дерева, см; a и b – коэффициенты регрессии). Коэффициенты регрессии находили при помощи линейной модели от логарифмированных зна-

чений, поэтому коэффициент a домножался на поправку Баскервиля [20] вида $\exp(\text{RSE}^2/2)$ (RSE – стандартная ошибка остатков регрессии). Расчеты моделей и визуализацию результатов проводили в программе R 3.5.1 [10].

Данные по фитомассе представлены на одно модельное дерево в килограммах и для всего насаждения – в тоннах на гектар абсолютно сухого вещества и в свежесрубленном состоянии. Запас фитомассы рассчитан на основе фактических данных, полученных для модельных деревьев. Сохранность культур в 12-летнем возрасте составила 80 и 88 % для сосны обыкновенной и сосны скрученной соответственно. Для корректной сравнительной оценки общей надземной фитомассы исследуемых пород густоту насаждения принимали равной 2 тыс. шт./га. Показатели влажности и содержания абсолютно сухого вещества фракций фитомассы приведены с ошибкой среднего значения.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание влаги в отдельных фракциях древостоя является важным показателем, необходимым для оценки фитомассы древесных пород, и позволяет определить количество абсолютно сухого вещества в экспериментальных культурах. Влажность компонентов фитомассы сосны скрученной варьирует от 47 до 67 %, сосны обыкновенной – от 50 до 70 %. Различия между двумя исследуемыми породами по влажности древесины невелики (1–2 %) и статистически незначимы – $p < 0,05$ (рис. 1). Влажность коры и ветвей сосны обыкновенной статистически значимо выше ($p < 0,05$), чем у сосны скрученной.

Влажность хвои для сосны обыкновенной изменяется от 51 до 64 %, для сосны скрученной – от 52 до 61 %. Довольно близкие значения приводятся для хвои сосны обыкновенной в среднетаежных сосняках Республики Коми – от 45 до 62 % [4]. Более низкие показатели получены в Архангельской области: влажность хвои сосны скрученной – от 52 до 56 %, сосны обыкновенной – от 47 до 53 % [18]. Хвоя текущего года у обеих пород имеет влажность выше, чем хвоя последующих лет. Схожая тенденция наблюдалась и другими исследователями в таежной зоне, что объясняется повышенной интенсивностью протекания метаболических процессов в хвое 1-го года [5, 18]. Влажность хвои сосны скрученной разного возраста на 1–3 % превосходит влажность сосны обыкновенной (рис. 1), это согласуется с результатами других исследователей [17]. В культурах Архангельской области для хвои текущего года и 3–4-летней хвои сосны скрученной наблюдалась более высокая влажность по сравнению с хвоей сосны обыкновенной [17]. Согласно данным [17], влажность хвои 1-го года для обеих пород приблизительно одинакова, а для хвои сосны обыкновенной 2-го года – немного выше, чем для сосны скрученной.

Содержание абсолютно сухого вещества исследуемых компонентов фитомассы изменяется от 30 до 69 % (табл. 1). При этом для большинства фракций фитомассы сосны скрученной оно выше, чем для сосны обыкновенной (в среднем на 5 %). Довольно близкие данные приводятся для содержания абсолютно сухого вещества в хвое (46–47 %) и побегах (48–55 %) сосны обыкновенной в культурах Архангельской области [3]. Корреляционный анализ не выявил связи между диаметром ствола и содержанием абсолютно сухого вещества в компонентах фитомассы, что соответствует литературным данным для сосны обыкновенной [3].

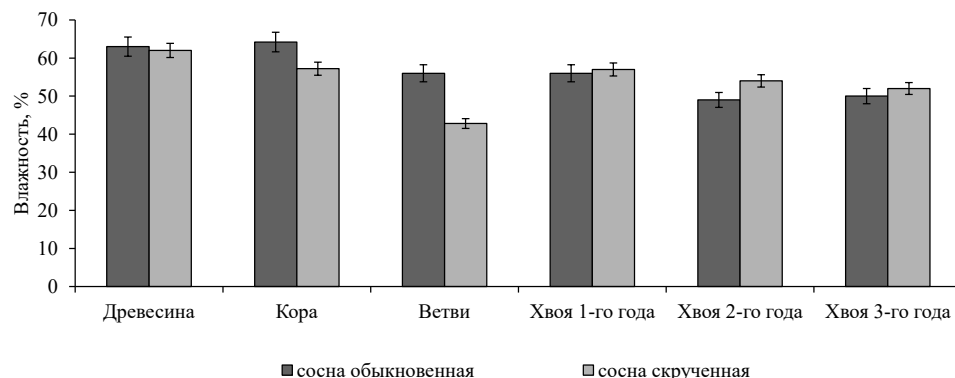


Рис. 1. Влажность компонентов фитомассы сосны обыкновенной и сосны скрученной

Fig. 1. Moisture content of phytomass components of Scots pine and lodgepole pine trees

Таблица 1

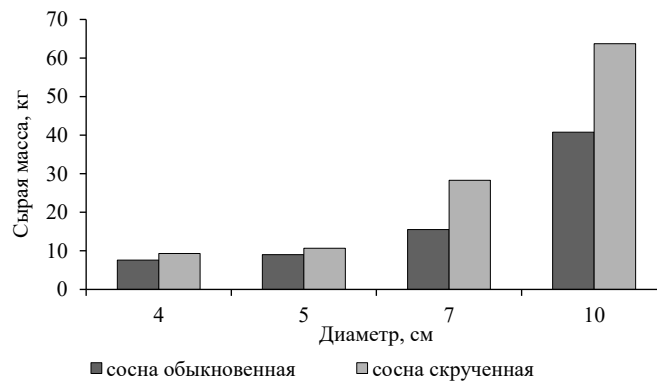
Содержание (%) абсолютно сухого вещества в сырой массе фракций сосны обыкновенной и сосны скрученной в зависимости от диаметра ствола
Content (%) of absolutely dry matter in the raw mass of fractions of Scots and lodgepole pine depending on trunk diameter

Диаметр ствола на высоте 1,3 м, см	Фракция фитомассы					Среднее
	Хвоя	Охвоенные побеги	Неохвоенные побеги	Древесина	Кора	
<i>Сосна обыкновенная</i>						
4	50±2	39±1	35±1	44±1	33±1	40±5
5	49±6	40±1	47±2	37±1	42±2	43±4
6	42±3	37±1	41±2	33±1	30±1	37±4
7	47±2	40±1	47±3	37±1	35±2	41±5
10	52±3	45±2	50±3	34±1	39±2	44±6
Среднее	48±3	40±2	44±5	37±3	36±4	41±2
<i>Сосна скрученная</i>						
4	46±2	43±1	52±2	41±1	43±2	45±3
5	52±2	43±1	69±4	42±2	45±2	50±8
7	45±1	43±1	46±3	33±1	44±1	42±4
8	44±2	43±1	66±3	40±1	39±1	46±7
10	44±2	44±2	53±2	37±1	43±1	44±4
Среднее	47±2	43±1	57±8	39±3	43±2	46±2

Масса модельных деревьев в сыром состоянии в зависимости от диаметра ствола для сосны обыкновенной изменяется от 7,6 до 40,8 кг, сосны скрученной – от 9,3 до 63,7 кг (рис. 2). То есть масса деревьев сосны скрученной при близких значениях диаметра ствола выше, чем у сосны обыкновенной. Это различие составляет от 18 до 45 % от сырой массы в зависимости от диаметра. Можно предположить, что с увеличением диаметра ствола масса сосны скрученной в свежесрубленном состоянии возрастает более интенсивно, чем масса сосны обыкновенной. Сырораствующая масса модельных деревьев обеих пород при диаметре ствола до 5 см повышается в 1,2 раза, а более 5 см – в 1,6–1,8 раза.

Рис. 2. Сырораствующая масса модельных деревьев сосны обыкновенной и сосны скрученной

Fig. 2. Raw-growing mass of Scots pine and lodgepole pine model trees



Масса абсолютно сухого вещества модельных деревьев сосны обыкновенной с увеличением диаметра ствола возрастает от 3 до 17 кг, сосны скрученной – от 4 до 27 кг (табл. 2). По мере роста диаметра ствола модельного дерева масса практически всех компонентов фитомассы обеих пород повышается. Исключение составляют сухие сучья, для которых не наблюдается увеличения массы по мере возрастания диаметра. Это связано с тем, что сухие ветви формируются по достижении определенного запаса и накапливаются постепенно [2]. В стволовой древесине исследуемых модельных деревьев аккумулируется 30...52 %, в коре – 4...8 %, в хвое – 14...32 %, ветвях – 16...39 % от общей массы дерева (табл. 2). С увеличением диаметра стволов модельных деревьев соотношение компонентов фитомассы меняется. Так, у модельных деревьев сосны обыкновенной с диаметром ствола 6 см стволовая древесина составляет 50 %, с диаметром 10 см – 26 % от общей массы дерева. Для модельных деревьев обоих видов с диаметром ствола 10 см характерен рост доли ветвей и снижение доли стволовой древесины в общей массе дерева. Доля абсолютно сухого вещества одного дерева в пределах одной ступени толщины у сосны скрученной выше, чем у сосны обыкновенной, на 34–37 %. Например, масса модельных деревьев диаметром 10 см у сосны скрученной составляет 27,26 кг, у сосны обыкновенной – 17,26 кг а.с.в. (табл. 2). Доля участия отдельных компонентов в фитомассе одного дерева у сосны скрученной и сосны обыкновенной несколько различается. Для модельного дерева сосны скрученной диаметром 10 см характерна более высокая доля стволовой древесины (38 %) по сравнению с сосной обыкновенной (26 %). Масса сухих сучьев у модельных деревьев сосны скрученной значительно меньше, чем у сосны обыкновенной, и не превышает 2 % от массы дерева.

Согласно исследованиям зарубежных авторов, средняя масса модельного дерева сосны скрученной с диаметром ствола 7,0 см в северной Швеции составляет 10,4 кг [22], в северной Канаде – 11,5 кг [24], при диаметре 9,2 см в условиях Швеции – 15,6 кг а.с.в. [19], что согласуется с нашими данными (табл. 2).

Проведенный регрессионный анализ показал хорошую сходимость аллометрической модели $y = ad^b$ с фактическими измерениями. Все полученные регрессионные коэффициенты являются статистически значимыми, а коэффициенты детерминации моделей (R^2) колеблются в пределах 0,81–0,96 (табл. 3). Исключение составляет масса сухих ветвей, для которой построенные модели оказались статистически незначимыми по обоим видам сосны.

Таблица 2

**Распределение надземной фитомассы по фракциям в модельных деревьях
сосны обыкновенной и сосны скрученной**
**Distribution of aboveground phytomass by fractions in model trees of Scots pine and
lodgepole pine, kg of absolutely dry matter**

Диаметр на высоте 1,3 м, см	Фитомасса по фракциям, кг а.с.в.							Всего живой фитомассы, кг а.с.в.	Итого, кг а.с.в.
	Высота, м	Длина кроны, м	Хвоя	Ветви	Древе- сина	Кора	Сухие сучья		
<i>Сосна обыкновенная</i>									
4	4,1	3,1	0,63	0,43	1,37	0,19	0,01	2,62	2,63
5	4,5	3,8	0,54	1,13	1,50	0,30	0,28	3,47	3,75
6	4,8	3,5	0,61	0,60	1,47	0,18	0,22	2,86	3,08
7	5,1	4,1	0,86	1,49	3,10	0,39	0,35	5,84	6,19
10	5,5	4,7	5,55	6,08	4,50	0,81	0,32	16,94	17,26
<i>Сосна скрученная</i>									
4	4,6	4,1	1,01	0,92	1,80	0,26	0,01	3,99	4,00
5	4,5	4,4	1,09	1,22	2,23	0,27	0,01	4,81	4,82
7	5,4	4,2	3,58	2,83	4,04	0,60	0,09	11,05	11,14
8	6,5	5,3	3,13	3,89	7,64	0,74	0	15,40	15,40
10	7,2	6,7	4,84	10,73	10,29	1,16	0,24	27,02	27,26

Следует отметить, что в аллометрических уравнениях наряду с диаметром ствола используется высота дерева [2]. По нашим данным, между этими показателями существует четко выраженная прямая зависимость. Коэффициент корреляции составил $r = 0,89$ ($p = 0,042$) для сосны обыкновенной и $r = 0,88$ ($p = 0,047$) для сосны скрученной. Таким образом, одновременное использование в моделях обоих параметров является избыточным, и мы взяли только один из них – диаметр ствола.

Сравнение коэффициентов регрессии анализируемых пород показало большую скорость роста сосны скрученной по сравнению с сосной обыкновенной как для общей фитомассы, так и для ее отдельных компонентов (рис. 3). Для всех компонентов фитомассы построенные модели являются статистически значимыми, за исключением связи с массой сухих сучьев. Для них зависимость от диаметра ствола не обнаружена.

Фитомасса сосны в свежесрубленном состоянии на исследуемом участке экспериментальных культур к 15-летнему возрасту составляет для сосны обыкновенной – 21 т/га, для сосны скрученной – 32 т/га сырого веса. Надземная фитомасса 15-летних культур сосны обыкновенной в условиях средней тайги Архангельской области – 22 т/га сырого веса [3].

Общая надземная фитомасса деревьев исследуемых экспериментальных культур в абсолютно сухом состоянии составляет для сосны обыкновенной – 8,1 т/га а.с.в., для сосны скрученной – 12,5 т/га а.с.в. Структура надземной фитомассы для обеих пород довольно схожа: на долю стволовой древесины приходится 42–44 %, ветвей – 25–27 %, коры – 6–7 % от общих запасов фитомассы. В условиях южной тайги Архангельской области для 13-летних культур сосны обыкновенной соотношение этих компонентов фитомассы – 37, 14 и 10 % соответственно [1]. Доля участия хвои в формировании надземной фитомассы сосны скрученной – 25 % от общих запасов фитомассы, что на 6 % выше, чем у сосны обыкновенной.

Таблица 3

Коэффициенты аллометрического уравнения и описание модели зависимости общей надземной фитомассы деревьев и ее компонентов (а.с.в.) от диаметра ствола для сосны обыкновенной и сосны скрученной
Coefficients of the allometric equation and model description of dependence of total aboveground phytomass of trees and its components (absolutely dry matter) on trunk diameter for Scots pine and lodgepole pine

Сосна	Описание						
	коэффициента уравнения				модели		
	Коэффициент	Значение	t-критерий	p-уровень	F-критерий	R ²	p-уровень
<i>Общая надземная фитомасса</i>							
Обыкновенная	<i>a</i>	0,051*	4,228	0,024	42,387	0,934	0,007
	<i>b</i>	2,578**	6,511	0,007			
Скрученная	<i>a</i>	0,075*	4,692	0,018	79,006	0,963	0,003
	<i>b</i>	2,556**	8,889	0,003			
<i>Хвоя</i>							
Обыкновенная	<i>a</i>	0,003*	5,640	0,011	32,461	0,915	0,011
	<i>b</i>	3,232*	5,697	0,011			
Скрученная	<i>a</i>	0,036*	3,628	0,036	20,749	0,874	0,020
	<i>b</i>	2,193*	4,555	0,020			
<i>Ветви</i>							
Обыкновенная	<i>a</i>	0,004*	4,559	0,020	22,688	0,883	0,018
	<i>b</i>	3,345*	4,763	0,018			
Скрученная	<i>a</i>	0,008*	5,030	0,015	37,237	0,925	0,009
	<i>b</i>	3,063**	6,102	0,009			
<i>Стволовая древесина</i>							
Обыкновенная	<i>a</i>	0,107*	2,882	0,063	15,013	0,833	0,030
	<i>b</i>	1,701*	3,875	0,030			
Скрученная	<i>a</i>	0,041**	7,257	0,005	112,529	0,974	0,002
	<i>b</i>	2,426**	10,608	0,002			
<i>Кора</i>							
Обыкновенная	<i>a</i>	0,011*	4,741	0,018	12,831	0,811	0,037
	<i>b</i>	1,917*	3,582	0,037			
Скрученная	<i>a</i>	0,010**	7,868	0,004	46,224	0,939	0,007
	<i>b</i>	2,055**	6,799	0,007			
<i>Сухие сучья</i>							
Обыкновенная	<i>a</i>	0,002	1,586	0,211	1,372	0,314	0,326
	<i>b</i>	2,939	1,172	0,326			
Скрученная	<i>a</i>	0,013	0,957	0,409	0,186	0,058	0,695
	<i>b</i>	1,685	0,432	0,695			

*, ** Коэффициенты, статистически значимые на уровне $p < 0,05$ и $p < 0,01$ соответственно.

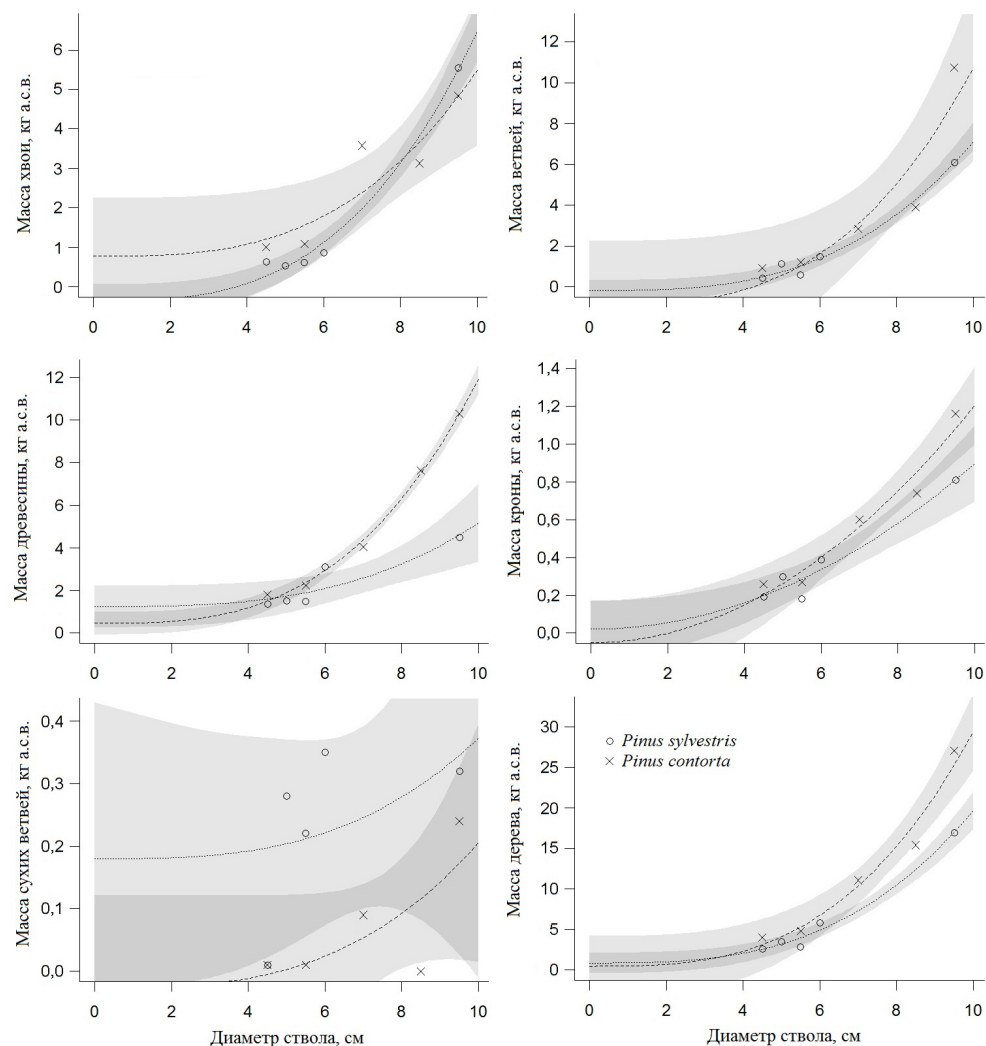


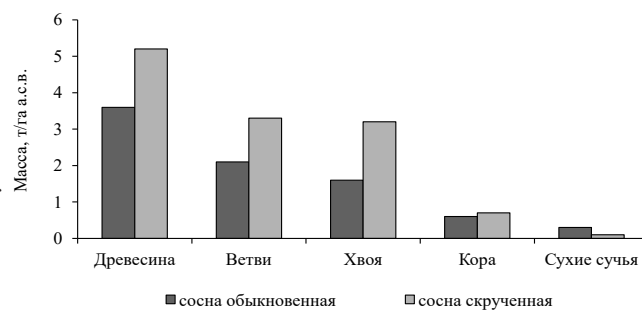
Рис. 3. Зависимость общей надземной фитомассы и ее компонентов от диаметра ствола для модельных деревьев сосны обыкновенной и сосны скрученной

Fig. 3. Dependence of total above-ground phytomass and its components on diameter for model trees of Scots pine and lodgepole pine

Масса почти всех компонентов надземной фитомассы сосны скрученной, за исключением сухих сучьев, на 20–50 % выше, чем у сосны обыкновенной (рис. 4). При этом масса стволовой древесины у сосны скрученной выше, чем у сосны обыкновенной, на 31 %. Это согласуется с данными ряда исследователей по объему ствола: сосна скрученная опережает сосну обыкновенную на 17–38 % [11, 15, 21]. Таким образом, сосна скрученная по запасам общей надземной фитомассы и ряду показателей превосходит сосну обыкновенную.

Рис. 4. Масса компонентов надземной фитомассы сосны обыкновенной и сосны скрученной, т/га а.с.в.

Fig. 4. Weight of components of aboveground phytomass of the studied species, t/ha of absolutely dry matter



Выводы

1. Установлено, что надземная фитомасса сосны скрученной на участке экспериментальных культур в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми при густоте посадки 2,5 тыс. шт./га составляет 12,5 т/га а.с.в., что в 1,5 раза больше, чем у сосны обыкновенной.

2. Превышение сосны скрученной над сосной обыкновенной по компонентам фитомассы составляет: для древесины – 31 %, для коры – 19 %, для хвои – 51 % и для ветвей – 39 %.

3. Построены регрессионные модели зависимости каждого компонента фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной от диаметра дерева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Клевцов Д.Н., Евдокимов И.В. Зональные закономерности изменения фитомассы культур сосны: моногр. Архангельск: САФУ, 2010. 140 с.

Babich N.A., Klevtsov D.N., Evdokimov I.V. *Zonal Patterns of Changes in the Phytomass of Pine Plantations*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2010. 140 p. (In Russ.).

2. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д. Биологическая продуктивность лесных культур. Архангельск: АГТУ, 1998. 89 с.

Babich N.A., Merzlenko M.D. *Biological Productivity of Forest Plantations*. Arkhangelsk, AGTU Publ, 1998. 89 p. (In Russ.).

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

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

4. Бобкова К.С., Галенко Э.П., Забоева И.В., Торлопова Н.В., Ивасишина Н.А., Кузин С.Н., Мартынюк З.П., Загирова С.В., Тужилкина В.В., Робакидзе Е.А., Сенькина С.Н., Мазура Н.С., Куприянова Е.Б., Мелехина Е.Н. Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера / отв. ред. К.С. Бобкова, Э.П. Галенко; УрО РАН. Урал. отд-ние. КомиНЦ. Ин-т биологии. СПб.: Наука, 2001. 278 с.

Bobkova K.S., Galenko E.P., Zaboieva I.V., Torlopova N.V., Ivasishina N.A., Kuzin S.N., Martinuk Z.P., Zagirova S.V., Tuzhilkina V.V., Robakidze E.A., Senkina S.N., Mazura N.S., Kupriyanova E.B., Melekhina E.N. *Bioproduction Process in the Forest Ecosystems of the North*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001. 278 p. (In Russ.).

5. Гутый Л.Н., Федорков А.Л. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 1. С. 48–54.

Gytyy L.N., Fedorkov A.L. Experimental Plantations of Longepole Pine in the Syktvykar Forestry in the Komi Republic. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2016, no. 1, pp. 48–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.1.48>

6. Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Демиденко С.А., Быков Ю.С., Парамонов А.А. Рост и развитие сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) в условиях северной тайги // Тр. СПбНИИЛХ. 2016. № 2. С. 45–59.

Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Demidenko S.A., Bykov Yu.S., Paramonov A.A. Growth, and Development of a Lodgepole Pine (*Pinus contorta* Loud. Var *latifolia* S. Wats) in the Northern Boreal Forest. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2016, no. 2, pp. 45–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.42>

7. Дроздов Ю.И. Сосна скрученная в культурах европейской части России // Лесохоз. информ. 2002. № 9. С. 21–23.

Drozдов Yu.I. Lodgepole Pine Plantations in the Cultures of the European part of Russia. *Forestry Information*, 2002, no. 9, pp. 21–23. (In Russ.).

8. Кофман Г.Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 211 с. Kofman G.B. *Growth and Shape of Trees*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 211 p. (In Russ.).

9. Мелехов И.С. Интродукция хвойных в лесном хозяйстве // Лесоведение. 1984. № 6. С. 72–78.

Melekhov I.S. Introduction of Coniferous Trees in Forestry. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1984, no. 6, pp. 72–78. (In Russ.).

10. Москалев А.А., Новаковский А.Б. Статистические методы в экологии с использованием R, Statistica, Excel и SPSS. Сыктывкар: СыктГУ, 2014. 197 с.

Moskalev A.A., Novakovsky A.B. *Statistical Methods in Ecology using R, Statistica, Excel and SPSS*. Syktyvkar, SSU Publ., 2014. 197 p. (In Russ.).

11. Раевский Б.В., Пеккоев А.Н. Перспективы выращивания сосны скрученной в Южной Карелии // Инновации и технологии в лесном хозяйстве – 2013: материалы III междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 22–24 мая 2013 г. СПб., 2013. Ч. 2. С. 180–190.

Raevsky B.V., Pekkoiev A.N. Prospects for Growing Lodgepole Pine in Southern Karelia. *Innovations and Technologies in Forestry–2013: Materials of the III International Conference Scientific and Practical conference*. Saint Peterburg, 2013. Part 2, pp. 180–190. (In Russ.).

12. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Usoltsev V.A. *Biological Productivity of Forests of Northern Eurasia: Methods, Database and its Applications*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2007. 636 p. (In Russ.).

13. Усольцев В.А., Залесов С.В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 147 с.

Usoltsev V.A., Zalesov S.V. *Methods for Determining the Biological Productivity of Plantings*. Yekaterinburg, USFU Publ., 2005. 147 p. (In Russ.).

14. Уткин А.И., Ифанова М.Г., Ермолова Л.С. Первичная биологическая продуктивность культур сосны обыкновенной во Владимирской области // Лесоведение. 1981. № 4. С. 19–27.

Utkin A.I., Ifanova M.G., Ermolova L.S. Primary Biological Productivity of Common Pine Plantations in the Vladimir Region. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1981, no. 4, pp. 19–27. (In Russ.).

15. Федорков А.Л., Гутый Л.Н. Состояние экспериментальных культур сосны скрученной в Республике Коми // Вестн. Ин-та биологии КомиНЦ УрО РАН. 2017. № 2(200). С. 25–31.

Fedorkov A.L., Gutiy L.N. The State of Experimental Plantations of Lodgepole Pine in the Komi Republic. *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo centra Ural'skogo otdeleniya Rossijskoj Akademii Nauk* = Bulletin of Institute of biology of the Komi Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017, no. 2, pp. 25–31. (In Russ.). [https://doi.org/10.31140/j.vestnikib.2017.2\(200\).5](https://doi.org/10.31140/j.vestnikib.2017.2(200).5)

16. Федорков А.Л., Туркин А.А. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Республике Коми // Лесоведение. 2010. № 1. С. 70–74.
- Fedorov A.L., Turkin A.A. Experimental Plantations of Lodgepole Pine in the Komi Republic. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2010, no. 1, pp. 70–74. (In Russ.).
17. Феклистов П.А., Бирюков С.Ю., Федяев А.Л. Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: АГТУ, 2008. 118 с.
- Feklistov P.A., Biryukov S.Yu., Fedyaev A.L. *Comparative Ecological and Biological Features of Lodgepole and Common pine in The Northern Subzone of the European Taiga*. Arkhangelsk, AGTU Publ., 2008. 118 p. (In Russ.).
18. Элайс Т.С. Североамериканские деревья: определитель / пер. с англ. Е.И. Рузановской; под ред. И.Ю. Коропачинского. Новосибирск: Гео, 2014. 959 с.
- Elais T.S. *North American trees: Determinant*. Novosibirsk, Geo Publ., 2014. 959 p. (In Russ.).
19. Backlund I., Bergsten U. Biomass Production of Dense Direct-Seeded Longepole Pine (*Pinus contorta*) at Short Rotation Periods. *Silva Fennica*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 609–623. <https://doi.org/10.14214/sf.914>
20. Baskerville G.L. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2, no. 1, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1139/x72-009>
21. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The Introduction of Lodgepole Pine for Wood Production in Sweden – a Review. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 141, iss. 1-2, pp. 15–29. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00485-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00485-0)
22. Elfving B., Ulvcrona K.A., Egnell G. Biomass Equations for Lodgepole Pine in Northern Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 47, no. 1, pp. 89–96. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0131>
23. Fedorkov A., Gutiy L. Performance of Lodgepole Pine and Scots Pine in Field Trials Located in North-West Russia. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no. 1. 10 p. <https://doi.org/10.14214/sf.1692>
24. Manning G.N., Massie M.R.C., Rudd J. Metric Single-Tree Weight Tables for the Yukon Territory. *Environment Canada, Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre*, Victoria, B.C., Inf. Rep. BC-X-250. 1984. 170 p.
25. Nilsson P., Cory N. Skogsdata, Aktuella Uppgifter om de Svenska Skogarna från Riksskogstaxeringen. *Forestry Statistics, Umeå, Sveriges Lantbruksuniversitet*, 2010. 119 p. (In Swedish).
26. Repola J. Biomass Equations for Scots Pine and Norway Spruce in Finland. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 605–624. <https://doi.org/10.14214/sf.184>
27. Varmola M., Salminen H., Rikala R., Kerkela M. Survival and Early Development of Lodgepole pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 15, iss. 4, pp. 410–423. <https://doi.org/10.1080/028275800750172619>
28. Zhigunov A.V., Butenko O.Y. Estimating the Growth of 20-to 26-year-old Lodgepole Pine Plantations in the Leningrad Region of Russia. *Folia Forestalia Polonica*, 2019, vol. 61, iss. 1, pp. 58–63.

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

Научная статья

УДК 630.231(23):582.475+630.181.522

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-44-56

Географические особенности возобновления *Pinus sibirica* Du Tour

Н.В. Танцырев¹, канд. биол. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAW-6195-2021](https://orcid.org/0000-0003-1904-4751),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1904-4751>

С.Н. Санников¹, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [M-8327-2018](https://orcid.org/0000-0003-1904-4751)

В.А. Усольцев^{1,2}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-1904-4751),

ORCID: [https://orcid.org/0000-0003-4587-8952](https://orcid.org/0000-0003-1904-4751)

¹Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; 89502076608@mail.ru, Usoltsev50@mail.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Usoltsev50@mail.ru

Поступила в редакцию 06.08.21 / Одобрена после рецензирования 13.11.21 / Принята к печати 19.11.21

Аннотация. Одной из главных проблем лесной экологии является анализ закономерностей динамики численности природных ценопопуляций древесных растений на этапе их возобновления, влияющем на последующую структуру и развитие биогеоценоза. Процесс возобновления определяется как динамикой семеношения, так и особенностями распространения семян лесообразующих древесных видов. Возобновление пятихвойных сосен подсекции *Cembrae* с бескрылыми семенами обусловлено тесными трофическими связями с птицами рода *Nucifraga* sp., которые, создавая почвенные кормовые запасы, разносят семена. Цель исследования – выявление географических особенностей связи между семеношением и возобновлением сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) при посредничестве участия тонкоклювой кедровки (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos* Brehm C.L.). Исследование выполнено в 3 географических регионах произрастания кедровых лесов: в лесах Алданского нагорья в Южной Якутии (59°40' с. ш. 125°24' в. д.), Северного Урала в районе горного массива Денежкин Камень (60°25' с. ш. 59°32' в. д.) и горного хребта Хамар-Дабан в Юго-Восточном Прибайкалье (51°32' с. ш. 103°32' в. д.). Показано, что каждый регион ареала произрастания *P. sibirica* отличается динамикой и семеношения, и возобновления. Установлено, что в лесах Алданского нагорья обилие всходов *P. sibirica* положительно связано ($R^2 = 0,46$) с урожаем шишек прошлого года. Количество всходов на Денежкином Камне и Хамар-Дабане отрицательно связано с урожаем прошлого года, но положительно ($R^2 = 0,48-0,49$) – с урожаем позапрошлого года. Мы считаем, что всходы в любом случае появляются из семян урожая прошлого года, а видимая связь с урожаем позапрошлого года обусловлена деятельностью кедровки. В результате проведенных стационарных исследований на Северном Урале выявлена постоянная тесная ($R^2 = 0,81$) положительная связь количества всходов *P. sibirica* с численностью кедровки в период запасаения и разноса семян в августе–сентябре предыдущего года. Сделано предположение, что характер динамики урожая семян в регионе влияет на изменение численности кедровки в период заготовки ею семян, которая, в свою очередь, определяет обилие всходов *P. sibirica* следующего года. Это обуславливает выявленные различия в динамике возобновления *P. sibirica* и ее зависимости от урожаев шишек в рассматриваемых регионах.

© Танцырев Н.В., Санников С.Н., Усольцев В.А., 2023

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

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, кедровка, численность кедровки, консортивная связь, орнитохория, семеношение, естественное возобновление сосны кедровой сибирской, всходы, запас семян, разнос семян, трофическая связь, кормовые запасы

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», № госрегистрации АААА-А17-117072810009-8.

Для цитирования: Танцырев Н.В., Санников С.Н., Усольцев В.А. Географические особенности возобновления *Pinus sibirica* Du Tour // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 44–56. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-44-56>

Original article

Geographical Features of *Pinus sibirica* Du Tour Renewal

Nikolai V. Tantsyrev^{1✉}, Candidate of Biology, Research Scientist; ResearcherID: [AAW-6195-2021](https://orcid.org/0000-0003-1904-4751), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1904-4751>

*Stanislav N. Sannikov*¹, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [M-8327-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952)

Vladimir A. Usoltsev^{1,2}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

¹Botanical Garden of Ural Branch of RAS, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; 89502076608@mail.ru[✉], Usoltsev50@mail.ru

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirsky Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru

Received on August 6, 2021 / Approved after reviewing on November 13, 2021 / Accepted on November 19, 2021

Abstract. One of the main problems of forest ecology is to identify the patterns of the dynamics of natural populations of woody plants at the stage of their renewal, which programs the entire subsequent structure and development of plant ecosystems. The process of reforestation is determined by both the dynamics of seed production and the peculiarities of the seed distribution of forest-forming tree species. The renewal of five-needled pines of the *Cembrae* subsection with wingless seeds is due to their close trophic relationships with birds of the genus *Nucifraga* sp., which spread seeds, creating soil forage stocks. The purpose of this study is to reveal geographical features of the relationship between seed production and renewal of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) with the intermediary participation of the thin-billed nutcracker (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos* Brehm C.L.). The research was carried out in 3 geographical regions of *Pinus sibirica* forests: in the forests of the Aldan Highlands in Southern Yakutia (59°40' N., 125°24' E.), the Northern Urals in the area of the Denezhkin Kamen mountain (60°25' N., 59°32' E.), and the Khamar-Daban Mountain range in the South-Eastern Baikal region (51°32' N., 103°32' E.). It is shown that each region of the *Pinus sibirica* growth differs in the dynamics of both seed production and renewal. It was found that the abundance of *Pinus sibirica* seedlings in the forests of the Aldan Highlands is positively associated ($R^2 = 0.46$) with the yield of cones the previous year. The number of seedlings in the Northern Urals and Khamar-Daban is negatively related to the yield of cones of last year but is positively ($R^2 = 0.48–0.49$) associated with the yield of cones of the year before last. We believe that seedlings in any case appear from the seeds of last year's yield. But the visible connection is due to the activity of the nutcracker. As a result of the stationary studies conducted in the Northern Urals, we identified a constant close ($R^2 = 0.81$) positive

relationship between the number of *Pinus sibirica* seedlings and the number of nutcrackers during the period of seed storage and dispersal in August-September of the previous year. It is assumed that the nature of the dynamics of seed production in the region affects the change in the number of nutcrackers during the seed harvesting period, which in turn determines the abundance of *Pinus sibirica* seedlings next year. This determines the revealed differences in the dynamics of *Pinus sibirica* renewal and its dependence on the yields of tree cones in the regions under consideration.

Keywords: Siberian stone pine, nutcracker, nutcracker abundance, consortial relationship, ornithochory, seed production, natural regeneration of Siberian stone pine, seedlings, seed abundance, seed dispersal, trophic relationship, feed stocks

Acknowledgements: The work was carried out under the state assignment of the Federal State Budgetary Institution "Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", State Registration No. AAAA-A17-117072810009-8.

For citation: Tantsyrev N.V., Sannikov S.N., Usoltsev V.A. Geographical Features of *Pinus sibirica* Du Tour Renewal. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 44–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-44-56>

Введение

Одна из главных проблем лесной экологии – это выявление динамики численности природных ценопопуляций древесных растений на стадии возобновления, обуславливающей структуру биогеоценоза и его развитие. Ключевым этапом процесса возобновления наряду с семеношением следует считать распространение семян лесообразующих древесных видов. Ярким примером зоохории (точнее, орнитохории) является возобновление представителей пятихвойных сосен подсемейства *Cembrae* с бескрылыми семенами благодаря тесным консортивным связям с птицами рода *Nucifraga* sp., которые, создавая почвенные кормовые запасы, разносят семена. В отличие от семян анемохорных лесообразующих видов, случайно попадающих на подходящий для прорастания субстрат, занос семян *Cembrae* и создание птицами кладовок осуществляются целенаправленно в конкретные типы микроэкоценозов с определенными условиями среды [14]. Поэтому к изучению процессов естественного возобновления данных видов необходим не традиционный лесоводственный, а син-экологический междисциплинарный комплексный подход с учетом положений орнитологии и зоопсихологии [12].

К настоящему времени сформировалось определенное представление о сложных когнитивных способностях птиц рода *Nucifraga* sp. [4, 8, 9, 18, 22, 25, 27]. Установлено, что их кормовые запасы строго индивидуальны, создаются обособленно от сородичей и других потребителей, крайне осторожно из опасения конкуренции и расхищения кладовок [4, 8, 21, 30]. Птицы находят свои кладовки благодаря феноменальной зрительной памяти, ориентируясь по расположению не заносимых снегом крупных объектов [4, 18]. Неиспользованные кладовки прорастают, образуя характерные плотные группы («гнезда») всходов. При этом непосредственная зависимость генераций всходов от обилия урожаев предшествующего года, характерная для анемохорных видов, наблюдается редко [7, 11, 15], а чаще всего отсутствует [13, 16, 23, 28, 29].

Цель исследования – выявление географических особенностей связи между семеношением и естественным подпологовым возобновлением сосны

кедровой сибирской (кедра сибирского) (*Pinus sibirica* Du Tour) при посредническом участии тонкоклювой кедровки (*Nucifraga caryocatactes macrorhynchos* Brehm C.L.).

Объекты и методы исследования

Сравнительное изучение динамики семеношения и естественного возобновления сосны кедровой сибирской (далее – кедр) проведено в горных лесах Алданского нагорья Витимо-Юдомской провинции горных лесов Алданского Юго-Западного лесорастительного района в Южной Якутии (Алданское лесничество, 59°40′ с. ш. 125°24′ в. д.); в Североуральской среднегорной провинции северотаежного округа Уральской горно-лесной области на Северном Урале в районе горного массива Денежкин Камень (60°25′ с. ш. 59°32′ в. д.); в районе горного хребта Хамар-Дабан Восточноприбайкальской горной лесорастительной провинции Хамар-Дабанского округа темнохвойных лесов Прибайкальской горной лесорастительной области в Юго-Восточном Прибайкалье (Иркутская область, Слюдянское лесничество, 51°32′ с. ш. 103°32′ в. д.). Пробные площади заложены в географически замещающих низкогорных 160–180-летних ягодниково-зеленомошных кедровниках Алданского нагорья и Северного Урала и в подгольцовых среднегорных кедровых баданово-кашкарниково-зеленомошных редколесьях хр. Хамар-Дабан. Выбирались участки, не подвергшиеся за последние 30–40 лет каким-либо катастрофическим воздействиям (пожар, массовый ветровал, рубка и т. д.), способным повлиять на динамику возобновления кедр.

Учет условий среды, численности всходов и подроста кедр проведен на 30–40 учетных площадках размером 5 × 5 м, систематически размещенных на соответствующих пробных площадях. Возраст подроста определен с точностью до одного года по числу годовичных вертикальных приростов терминального побега. Динамика первоначальной численности ежегодных генераций всходов реконструирована по возрастной структуре подроста и эмпирическим коэффициентам кривых его выживания, ранее предложенных нами [10]. Годичная динамика урожая установлена по следам от опавших шишек («рубцам зарастания») у основания годовичных побегов [5] на 5–8 ветвях, взятых из верхней части крон 15–20 деревьев. Визуальный учет относительной численности (встречаемости) кедровки был выполнен только на Северном Урале. Он проводился ежегодно в августе–сентябре на постоянных маршрутах протяженностью 7 км, в полосе шириной 50 м, расположенной по обе стороны от ходовой линии, в течение 30–40-дневного периода заготовки семян кедровкой. Встречаемость кедровки выражена численностью птиц за час учета [16].

Результаты исследования и их обсуждение

Для низкогорных ягодниково-зеленомошных кедровников района Алданского нагорья и Северного Урала показателем высокого относительного урожая можно считать в среднем 2,2–2,4 рубца от опавших шишек на годовичном побеге, а для подгольцовых кедровых редколесий горного массива Хамар-Дабан – 1,8–2,2 шишки в год. За сравниваемые временные периоды средний относительный урожай шишек (см. таблицу) в Южной Якутии (1,9 шт.) почти в 1,5 раза выше, чем на Урале и на Хамар-Дабане (по 1,4 шт.). Возможно, этим вызвано более

обильное ежегодное возобновление кедр на моховом покрове под материнским пологом кедровника на Алданском нагорье (1,3 тыс. экз./га), чем в сходных условиях географически замещающего типа кедровника на Северном Урале (1,0 тыс. экз./га), и, соответственно, почти в 1,5 раза большее накопление общего количества подроста за рассматриваемый период (см. таблицу). Менее обильное возобновление в подгольцовых редколесьях Хамар-Дабана (1,8 тыс. гнезд/га), скорее всего, связано с тем, что доступу кедровки к почвенному субстрату для создания кладовок препятствуют плотные заросли *Bergenia crassifolia* и *Rhododendron aureum* с проективным покрытием 66,3±5,1 %, тогда как общее проективное покрытие разрозненных пятен мохового покрова, основного предпочитаемого кедровкой субстрата, составляет лишь 25,6±4,2 %.

Параметры экотопа и возобновления ценопопуляций сосны кедровой сибирской
Parameters of ecotope and renewal of cenopopulations of Siberian stone pine

Регион	Высота над уровнем моря, м	Период, годы	Характеристика древостоя				Численность			
			Состав	Средняя высота, м	Относительная полнота	Nш	Nп	No.г.	Nв	
Алданское нагорье	500	2001–2012	5К2Е1С1Л1Б	23	0,6	1,9± ±0,12	3,2± ±0,22	4,0± ±0,28	1,3± ±0,19	
Северный Урал	550	1998–2012	6К2С1Л1Б	22	0,6	1,4± ±0,18	2,2± ±0,18	2,9± ±0,24	1,0± ±0,14	
Хр. Хамар-Дабан	1700	2003–2015	9К1Е	16	0,2	1,4± ±0,11	1,8± ±0,14	3,5± ±0,40	1,0± ±0,15	

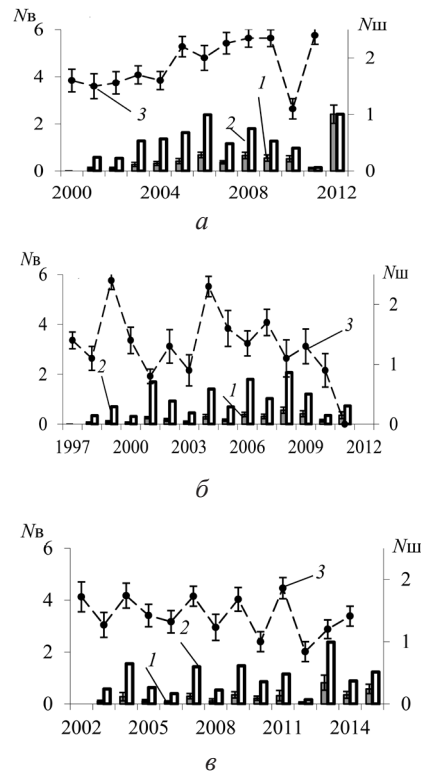
Примечание: Nш – средний показатель урожая по рубцам от опавших шишек на годовичном побеге, шишек/год; Nп – общая численность проросших кладовок (гнезд) подроста кедр, тыс. шт./га; No.г. – количество особей кедр в гнездах, тыс. экз./га; Nв – реконструированная ежегодная численность всходов, тыс. экз./га.

В динамике семеношения кедровника в районе Алданского нагорья практически нет резких колебаний (рис. 1, а). Она характеризуется значительно меньшей хронологической изменчивостью ($C_v = 21,6 \%$), чем на Урале ($C_v = 46,5 \%$) и Хамар-Дабане ($C_v = 30,9 \%$). Период с 2000 по 2004 гг. с практически одинаковыми повышенными урожаями сменяется таким же по протяженности относительно ровным периодом высоких урожаев. Исключение составляет менее урожайный 2010 г. (1,1±0,18 шишки/год). В кедровниках Северного Урала, в соответствии с выявленной ранее импульсной циклической динамикой урожаев шишек [16], высокие урожаи (1988, 1994, 1999, 2004 гг.) повторяются через 4–5 лет, чередуясь с низко- и среднеурожайными годами (рис. 1, б). В выраженной волнообразной динамике подгольцовых кедровых редколесий хр. Хамар-Дабан относительно высокие и повышенные урожаи повторяются преимущественно через год, между ними следуют годы с пониженными и средними урожаями (рис. 1, в).

Динамика генераций всходов в рассматриваемых регионах неравномерна, иногда наблюдаются значительные скачки ($C_v = 50,0–98,2 \%$), в т. ч. на Алданском нагорье при относительной стабильности урожаев (рис. 1, а).

Рис. 1. Погодичная динамика относительных урожаев шишек и возобновления кедр: *a* – в кедровнике Алданского нагорья; *б* – в кедровнике Северного Урала; *в* – в подгольцовых редколесьях Хамар-Дабана (*1* – численность подроста, тыс. экз./га; *2* – первоначальная численность всходов, тыс. экз./га; *3* – относительный урожай шишек (на годичном побеге) с ошибкой среднего значения)

Fig. 1. Annual dynamics of relative cone yields and Siberian stone pine renewal in the forests: *a* – of the Aldan Highlands; *б* – of the Northern Urals; *в* – of the Khamar-Daban mountain range (*1* – number of undergrowth, thousand/ha; *2* – initial number of seedlings, thousand/ha; *3* – relative cone yield (cones per annual shoot) with a mean value error)



Но даже небольшие колебания урожаев сказываются здесь на динамике последующего появления всходов под пологом материнского кедровника. Их обилие за период 2001–2012 гг. относительно тесно и положительно связано ($R^2 = 0,46$) с урожаем шишек предыдущего года (рис. 2, *a*). В отличие от Алданского нагорья в сходных условиях географически замещающего типа кедровника Северного Урала (рис. 1, *б*) и в подгольцовых кедровых редколесьях хр. Хамар-Дабан (рис. 1, *в*) наблюдается снижение численности всходов непосредственно на следующий год после высокоурожайных и, наоборот, обильное появление всходов после относительно слабого урожая, что характеризуется отрицательной связью с урожаем предыдущего года (рис. 2, *в*, *д*). Более обильное появление всходов в этих регионах происходит преимущественно через 2 года после высоких урожаев, что подтверждается положительной связью ($R^2 = 0,48–0,49$) с урожаем позапрошлого года (рис. 2, *г*, *е*).

Причина подобных закономерностей в первую очередь заключается в наличии почвенного банка семян кедр с их длительным покоем, когда они прорастают, пролежав в почве 2 зимы [28]. Однако такой вывод опровергают результаты нашего исследования в районе Алданского нагорья и тот факт, что на следующий год после абсолютно неурожайного 2011 г. на Северном Урале всходов не обнаружено. Кроме того, по многочисленным наблюдениям в условиях питомников, основная масса семян прорастает непосредственно в год посева и не более 10–15 % с пониженной всхожестью – на следующий год. Причем всходы, как правило, гибнут, не выдерживая конкуренции со всходами предыдущего года. Таким образом, мы имеем закономерность, связанную со всходами, проросшими из семян прошлогоднего урожая, а выявленная связь их обилия с урожаем позапрошлого года фактически опосредует влияние неучтенного фактора.

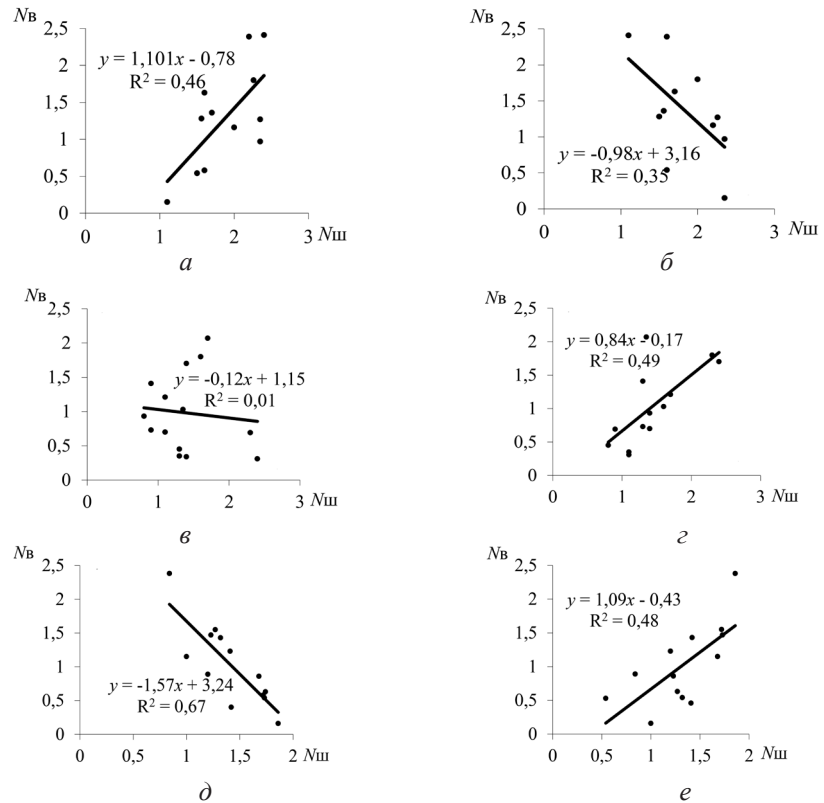


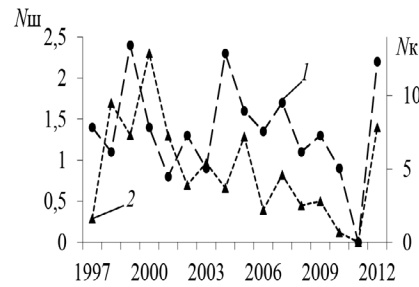
Рис. 2. Связь численности всходов с урожаем шишек предыдущего (а, в, д) и позапрошлого (б, г, е) годов: а, б – Южная Якутия, Алданское нагорье; в, г – Северный Урал, горный массив Денежкин Камень; д, е – Юго-Восточное Прибайкалье, хр. Хамар-Дабан

Fig. 2. Relationship between the number of seedlings and cone yield of the previous year (а, в, д) and the year before last (б, г, е): а, б – in the Southern Yakutia, the Aldan Highlands; в, г – in the Northern Urals, Denezhkin Kamen mountain massif; д, е – in the South-Eastern Pribaikalia, the Khamar-Daban mountain range

Отличие корреляционной связи от функциональной состоит в том, что первая лишь констатирует наличие закономерности, но не объясняет ее, не раскрывает механизма взаимодействия факторов [1], фиксируя лишь параллелизм в изменчивости признаков, источником которого может быть действие неких третьих факторов [6]. Применительно к нашему объекту одним из них является деятельность кедровки как промежуточного звена между семеношением и возобновлением кедра. Проводимый учет относительной численности (встречаемости) кедровки на Северном Урале в период запасаения и разноса семян в августе–сентябре показал, что примерно до 2006 г. колебания динамики численности птиц в какой-то мере повторяют резкие колебания скачкообразной импульсной динамики урожая шишек предыдущего года (рис. 3), что подтверждается значимой положительной связью ($R^2 = 0,55$; рис. 4, а). Такое запаздывание характерно для отношений и других растений с основными потребителями их семян при подобной импульсной динамике семеношения [20, 32] и соответствует известным консортивным связям в системе «продуцент–консумент» [2, 17].

Рис. 3. Погодичная динамика относительных урожаев шишек на побеге (1) и относительной численности кедровки на Северном Урале (N_k), особей/ч (2)

Fig. 3. Annual dynamics of Siberian stone pine relative cone crops, cones per shoot (1) and the relative nutcrackers number, individuals per hour (2), in the Northern Urals



С 2006 г. колебания динамики урожаев и встречаемости кедровки становятся синхронными (рис. 3). В результате проявляется тесная ($R^2 = 0,84$) связь их встречаемости с урожаем текущего года (рис. 4, б). Подобная синхронность наблюдается в колебаниях численности других потребителей семян кедровки [4, 33] и обусловлена их миграциями в поисках обильной кормовой базы.

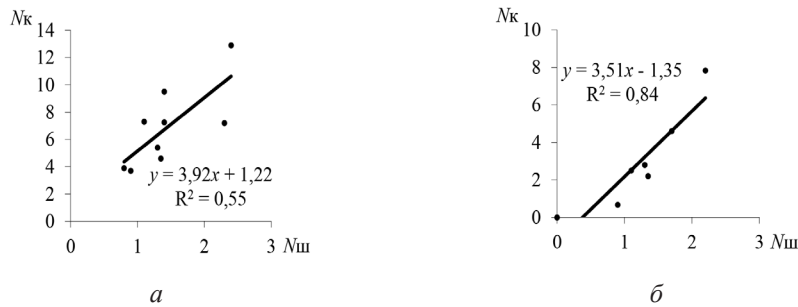


Рис. 4. Связь относительной численности кедровки с урожаями шишек предыдущего года (а) за период 1997–2006 гг. и текущего года (б) за период 2006–2012 гг. на Северном Урале

Fig. 4. Relationship between the relative number of nutcrackers and the yield of cones of the previous year (a) for the period 1997–2006 and the current year (b) for the period 2006–2012 in the Northern Urals

Вместе с тем прослеживается определенная практически постоянная синхронность колебаний динамики возобновления кедровки с колебаниями численности (встречаемости) кедровки предыдущего года (рис. 5). Соответственно, всплески численности всходов бывают на следующий год после увеличения встречаемости кедровки в период запаса семян, а спад возобновления наблюдается на следующий год после их сокращения. В результате проявляется тесная ($R^2 = 0,81$) положительная связь относительной численности всходов кедровки с относительной численностью кедровки (рис. 6) в августе–сентябре предыдущего года, т. е. в период активной заготовки и разноса семян.

Характерной для птиц особенностью является то, что с увеличением их численности снижается осторожность каждой отдельной особи, они становятся более доступными для хищников в качестве жертв [3], т. е. возрастает количество гибнущих птиц. Кедровка использует для пропитания и выкармливания птенцов до 85 % своих запасов [4, 25]. Возможно, основная масса всходов появляется из кладовок, не использованных кедровкой вследствие гибели особей или откочевки. Иными словами, чем выше численность кедровки в регионе в период заготовки и разноса семян кедровки, тем больше птиц гибнет в течение зимы и, следовательно, тем больше кладовок семян не будет использовано и прорастет.

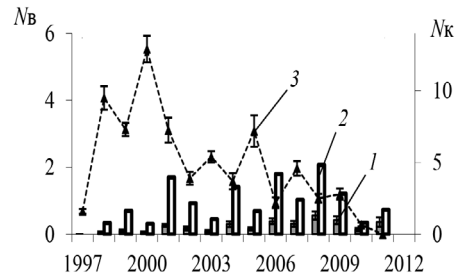


Рис. 5. Погодичная динамика относительной численности кедровки и возобновления кедра на Северном Урале: 1 – численность подраста, тыс. экз./га; 2 – первоначальная численность всходов, тыс. экз./га; 3 – относительная численность кедровки на маршруте (особей/ч) с ошибкой среднего значения

Fig. 5. Annual dynamics of the relative number of nutcracker and Siberian stone pine renewal in the Northern Urals: 1 – number of undergrowth, thousand/ha, 2 – initial number of seedlings, thousand/ha, 3 – relative number of nutcrackers on the route (individuals per hour) with a mean value error

В то же время недостаток или неустойчивость кормовой базы (низкий урожай семян) могут привести к снижению численности птиц и даже их отказу от гнездования [3, 19, 24, 26], как это случилось в 2011 г. Таким образом, последующий высокий урожай остается неиспользованным в полной мере в качестве запасаемого корма немногими оставшимися потребителями [31]. Если число кедровок в том или ином регионе условно мало, даже при высоком урожае семян кедра количество всходов на следующий год будет незначительным. Когда урожай текущего года ниже предыдущего, наблюдается его максимальное использование – запасание семян возросшим количеством птиц [3]. По-видимому, минимальное количество всходов (не более 0,1 тыс. экз./га), наблюдаемое на Северном Урале в 2000 г. (рис. 1, а) после высокого урожая (2,4 шишки/год) в 1999 г., вызвано почти полным потреблением кедровкой своих запасов для выкармливания возросшего по сравнению с предыдущим годом числа птенцов (рис. 5) и, возможно, низкой гибелью птиц.

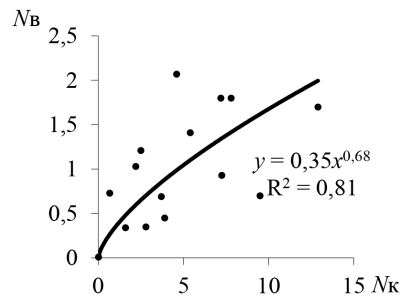


Рис. 6. Связь численности всходов кедра с относительной численностью кедровки в августе–сентябре предыдущего года на Северном Урале

Fig. 6. Relationship of seedling abundance to relative nutcracker abundance in August-September of the previous year in the Northern Urals

По всей вероятности, резкие скачки погодичной динамики встречаемости кедровки и изменение связи динамики с урожаями вызваны как количественными изменениями местной популяции, так и миграциями представителей других регионов [3, 9, 21, 30] – например, резкое увеличение количества птиц в 1998 г. и особенно в 2000 г. после высокоурожайного 1999 г. и последующий резкий спад (рис. 3). В абсолютно неурожайный 2011 г. кедровки не отмечены, т. к. откочевали в другие регионы в поисках корма. Видимо, количество кедровки в регионе зависит одновременно от урожая предшествующего года, оказывающего влияние на количество птенцов в выводках, и от урожая текущего года (в т. ч.

в смежных регионах), который вызывает миграцию птиц. В 1-м случае проявляется типичная консортивная связь (рис. 4, а), возможно, в отдельные годы дополненная мигрирующими птицами, во 2-м – колебания погодичной динамики численности кедровки совпадают с урожаями (рис. 4, б). При этом, несмотря на подобные изменения и значительное варьирование по годам численности кедровки, связь возобновления с численностью птиц предыдущего года в период запасаения ими семян остается неизменной (рис. 6).

Можно предположить, что поскольку в районе Алданского нагорья численность всходов кедра зависит от урожая предыдущего года, то при относительно стабильных на протяжении ряда лет повышенных урожаях численность местной популяции кедровки также мало подвержена колебаниям и является (по аналогии с ролью ветра) постоянно действующим фактором разноса семян. В подгольцовых редколесьях хр. Хамар-Дабан обилие всходов положительно связано с урожаем шишек позапрошлого года, т. е., как и на Северном Урале, оно обусловлено колебаниями численности местной популяции кедровки предыдущего года, которая, в свою очередь, коррелирует с урожаями семян кедра предшествующего года.

Заключение

Каждому региону ареала произрастания сосны кедровой сибирской (кедра) соответствует своя динамика семеношения. Ключевым фактором количественного возобновления кедра является численность кедровки в период запасаения и разноса семян в предыдущем году. Она зависит от урожаев семян как предыдущего, так и текущего года и отчасти – от урожая в смежных регионах. Установленные в 3 исследованных регионах разнонаправленные зависимости количества всходов от урожая семян прошлого и позапрошлого годов могут быть результатом деятельности кедровки и зависеть от ее численности в предыдущем году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арманд Д.Л. Функциональные и корреляционные связи в физической географии // Изв. ВГО. 1949. Т. 81, вып. 1. С. 81–94.
Armand D.L. Functional and Correlation Relations in Physical Geography. *Izvestiya Vsesoyuznogo Geograficheskogo Obshchestva*, 1949, vol. 81, iss. 1, pp. 81–94. (In Russ.).
2. Бигон М., Харпер Д., Таунсенд К. Экология. Особи, популяции и сообщества / пер. с англ. под ред. А.М. Гилярова. Т. 2. М.: Мир, 1989. 477 с.
Bigon M., Harper D., Townsend K. *Ecology. Individuals, Populations and Communities*. Moscow, Mir Publ., 1989, vol. 2. 477 p. (In Russ.).
3. Владышевский Д.В. Экология лесных зверей и птиц (Кормодобывание и его биогеоценотическое значение). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 264 с.
Vladyshevsky D.V. *Ecology of Forest Animals and Birds. Forage Extraction and its Biogeocenotic Significance*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 264 p. (In Russ.).
4. Воробьев В.Н. Кедровка и ее взаимосвязи с кедром сибирским (Опыт количественного анализа). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 113 с.
Vorobyov V.N. *Nutcracker and its Interrelations with Siberian Cedar (Experience of Quantitative Analysis)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 113 p. (In Russ.).
5. Горчаковский П.Л. Новое в методике исследования семеношения хвойных // Ботан. журн. 1958. Т. 43, № 10. С. 1445–1459.

- Gorchakovskiy P.L. New in the Methodology of Research of Coniferous Seed Bearing. *Botanicheskiy Zhurnal = Botanical Journal*, 1958, vol. 43, no. 10, pp. 1445–1459. (In Russ.).
6. Колмогоров А.Н. К вопросу о пригодности найденных статистическим путем формул прогноза // Заводск. лаб. 1933. № 1. С. 164–167.
- Kolmogorov A.N. On the Question of the Suitability of the Forecast Formulas found by Statistical Means. *Zavodskaya Laboratoriya*, 1933, no. 1, pp. 164–167. (In Russ.).
7. Николаева С.А., Савчук Д.А. Динамика возобновления кедрового сибирского на Кеть-Чулымском междуречье (Западно-Сибирская равнина) // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 3, № 4. С. 64–68.
- Nikolaeva S.A., Savchuk D.A. The Siberian Pine Regeneration Dynamics in the Ket-Chulyum Interfluvium (West Siberian Plain). *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 64–68. (In Russ.).
8. Омелько А.М., Омелько М.М. Особенности создания кедровой (*Nucifraga caryocatactes* L.) запасов кедровых орешков и питания ими в зимний период во вторичных широколиственных лесах с посадками сосны корейской (*Pinus koraiensis* Sieb. Et Zucc.) // Амур. зоол. журн. 2017. Т. IX, № 2. С. 102–111.
- Omelko A.M., Omelko M.M. Peculiarities of Creation and Feeding of Pine Nut Reserves by Nutcracker (*Nucifraga caryocatactes* L.) during Winter in Secondary Broadleaved Forests with Korean Pine Plantations (*Pinus koraiensis* Sieb. Et Zucc.). *Amurskiy Zoologicheskii Zhurnal = Amurian Zoological Journal*, 2017, vol. IX, no. 2, pp. 102–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.33910/1999-4079-2017-9-2-102-111>
9. Реймерс Н.Ф. Птицы и млекопитающие южной тайги Средней Сибири. М.; Л.: Наука, 1966. 420 с.
- Reimers N.F. *Birds and Mammals of the Southern Taiga of Western Siberia*. Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1966. 420 p. (In Russ.).
10. Санников С.Н., Танцырев Н.В. Кривые выживания подростов кедрового // Лесоведение. 2015. № 4. С. 275–281.
- Sannikov S.N., Tantsyrev N.V. Survival Curves of Siberian Pine Undergrowth as a Basis for Reconstructing its Population Dynamics. *Lesovedenie = Russian Forestry Science*, 2015, no. 4, pp. 275–281. (In Russ.).
11. Санников С.Н., Танцырев Н.В., Петрова И.В. Инвазия популяций сосны сибирской в горную тундру Северного Урала // Сиб. экол. журн. 2018. № 4. С. 449–461.
- Sannikov S.N., Tantsyrev N.V., Petrova I.V. Invasion of Siberian Pine Populations in Mountain Tundra in The Northern Urals. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, no. 4, pp. 449–461. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1995425518040078>
12. Сотская М.Н. Зоопсихология и сравнительная психология. Т. 1. М.: Юрайт, 2014. 323 с.
- Sotskaya M.N. *Zoopsychology and Comparative Psychology*. Vol. 1. Moscow, Yurayt Publ., 2014. 323 p. (In Russ.).
13. Сташкевич Н.Ю., Шишикин А.С. Зоогенный фактор возобновления сосны кедровой сибирской в горно-таежных лесах Восточного Саяна // Сиб. экол. журн. 2014. № 2. С. 313–318.
- Stashkevich N.Yu., Shishikin A.S. Zoogenic Factor of Siberian Pine Restoration in the Mountain Taiga Forests of East Sayan. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, no. 2, pp. 313–318. (In Russ.).
14. Танцырев Н.В. Анализ размещения кедровой кладовки семян кедрового сибирского по следам их зимнего использования // Вестн. Бурят. ГСХА им. В.П. Филиппова. 2020. № 3(60). С. 117–125.
- Tantsyrev N.V. Analysis of Placement of Siberian Pine Seeds Storage by Nutcracker in Traces of their Winter Use. *Vestnik Buryatskoy Gosudarstvennoy Selskokhozyaystvennoy*

akademii im. V.R. Filippova = Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, 2020, vol. 3, no. 60, pp. 117–125. (In Russ.).

15. Танцырев Н.В. Интенсивность возобновления кедрового стланика в связи с урожаями семян в Южной Якутии // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. XL, № 1. С. 54–59.

Tantsyrev N.V. The Intensity of Japanese Pine Renewal in Connection with the Seed Yields in South Yakutia. *Conifers of the Boreal Area*, 2022, vol. XL, no. 1, pp. 54–59. (In Russ.).

16. Танцырев Н.В., Санников С.Н. Анализ консортивных связей между кедром сибирским и кедровкой на Северном Урале // Экология. 2011. № 1. С. 20–24.

Tantsyrev N.V., Sannikov S.N. Analysis of Consortive Relationships between the Siberian Pine and the Nutcracker in the Northern Urals. *Ecology*, 2011, vol. 42, no. 1, pp. 20–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1067413611010127>

17. Тимофеев-Ресовский Н.В., Яблоков А.В., Глотов Н.В. Очерк учения о популяции. М.: Наука, 1973. 277 с.

Timofeev-Resovsky N.V., Yablokov A.V., Glotov N.V. *An Outline of the Doctrine of Population*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 277 p. (In Russ.).

18. Bednekoff P.A., Balda R.P. Clark's Nutcracker Spatial Memory: The Importance of Large, Structural Cues. *Behavioural Processes*, 2014, vol. 102, pp. 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2013.12.004>

19. Bogdziewicz M., Zwolak R., Crone E.E. How Do Vertebrates Respond to Mast Seeding? *Oikos*, 2015, vol. 125, iss. 3, pp. 300–307. <https://doi.org/10.1111/oik.03012>

20. Boutin S., Wauters L.A., McAdam A.G., Humphries M.M., Tosi G., Dhondt A.A. Anticipatory Reproduction and Population Growth in Seed Predators. *Science*, 2006, vol. 314, iss. 5807, pp. 1928–1930. <https://doi.org/10.1126/science.1135520>

21. Clary D., Kelly D.M. Cache Protection Strategies of a Non-Social Food-Caching Corvid, Clark's Nutcracker (*Nucifraga columbiana*). *Animal Cognition*, 2011, vol. 14, no. 5, pp. 735–744. <https://doi.org/10.1007/s10071-011-0408-3>

22. Holmgren M.L., Wilkerson R.L., Siegel R.B. Assessing Trends and Vulnerabilities in the Mutualism Between Whitebark Pine (*Pinus albicaulis*) and Clark's Nutcracker (*Nucifraga columbiana*) in National Parks of the Sierra-Cascade Region. *PLoS One*, 2020, vol. 15, iss. 10, art. e0227161. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227161>

23. Kajimoto T., Onodera H., Ikeda S., Daimaru H., Seki T. Seedling Establishment of Subalpine Stone Pine (*Pinus pumila*) by Nutcracker (*Nucifraga*) Seed Dispersal on Mt. Yumori, Northern Japan. *Arctic and Alpine Research*, 1998, vol. 30, no. 4, pp. 408–417. <https://doi.org/10.2307/1552014>

24. Krebs C.J., Boonstra R., Boutin S., Sinclair A.R.E., Smith J.N.M., Gilbert B.S., Martin K., O'Donoghue M., Turkington R. Trophic Dynamics of the Boreal Forests of the Kluane Region. *Arctic*, 2014, vol. 67, no. 5, pp. 71–81. <https://doi.org/10.14430/arctic4350>

25. Lanner R.M. *Made For Each Other. A Symbiosis of Birds and Pines*. New York, Oxford, Oxford University Press, 1996. 160 p.

26. Schaming T.D. Population-Wide Failure to Breed in the Clark's Nutcracker (*Nucifraga columbiana*). *PLoS One*, 2015, vol. 10, iss. 5, art. e0123917. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123917>

27. Schaming T.D. Clark's Nutcracker Breeding Season Space Use and Foraging Behavior. *PLoS One*, 2016, vol. 11, iss. 2, art. e0149116. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149116>

28. Tillman-Sutela E., Kauppi A., Karppinen K., Tomback D. Variant Maturity in Seed Structures of *Pinus albicaulis* (Engelm.) and *Pinus sibirica* (Du Tour): Key to a Soil Seed Bank, Unusual Among Conifers? *Trees*, 2008, vol. 22, no. 2, pp. 225–236. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0179-2>

29. Tomback D.F., Anderies A.J., Carsey K.S., Powell M.L., Mellmann-Brown S. Delayed Seed Germination in Whitebark Pine and Regeneration Patterns Following the Yellowstone Fires. *Ecology*, 2001, vol. 82, no. 9, pp. 2587–2600. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[2587:DSGIWP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[2587:DSGIWP]2.0.CO;2)

30. Tornick J.K., Rushia S.N., Gibson B.M. Clark's Nutcrackers (*Nucifraga columbiana*) are Sensitive to Distance, but not Lighting when Caching in the Presence of a Conspecific. *Behavioural Processes*, 2016, vol. 123, pp. 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2015.10.023>

31. Vander Wall S.B. Masting in Animal-Dispersed Pines Facilitates Seed Dispersal. *Ecology*, 2002, vol. 83, iss. 12, pp. 3508–3516. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[3508:MIADPF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[3508:MIADPF]2.0.CO;2)

32. Wauters L.A., Githiru M., Bertolino S., Molinari A., Tosi G., Lens L. Demography of Alpine Red Squirrel Populations in Relation to Fluctuations in Seed Crop Size. *Ecography*, 2008, vol. 31, iss. 1, pp. 3–160. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05251.x>

33. Zong C., Wauters L.A., Van Dongen S., Mari V., Romeo C., Martinoli A., Preatoni D., Tosi G. Annual Variation in Predation and Dispersal of Arolla Pine (*Pinus cembra* L.) Seeds by Eurasian Red Squirrels and other Seed-Eaters. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 260, iss. 5, pp. 587–594. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.05.014>

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

Original article

УДК 630*232.32(031):631*544.71

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-57-69

Effect of Nutrient Substrate on Seedling Growth and Biomass Allocation of *Picea obovata* Ledeb. in Northern Mongolia

Damdinjams Jagdag¹, Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9237-7627>

Ganbaatar Batsaikhan², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7752-2286>

Nachin Baatarbileg¹, Candidate of Agriculture, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3489-1257>

Anatoly I. Lobanov³, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [ABB-8764-2020](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>

Sukhbaatar Gerelbaatar⁴, Candidate of Biology, Prof.; ResearcherID: [AAK-4597-2021](https://orcid.org/0000-0002-9561-5256),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9561-5256>

¹Institute of Forestry Science of the National University of Mongolia, ul. Universitetskaya, 1, Ulaanbaatar, 14201, Mongolia; jagdag_0301@yahoo.com, baatarbileg@num.edu.mn

²Institute of Geography and Geoecology of the Mongolian Academy of Sciences, ul. Baruun Selbe, 15, Ulaanbaatar, 15170, Mongolia; batlaa_85@yahoo.com

³Scientific Research Institute of Agrarian Problems of Khakassia, ul. Sadovaya, 5, Zelenoe village, Republic of Khakassia, 655132, Russian Federation; anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru[✉]

⁴School of Engineering and Technology, National University of Mongolia, ul. Universitetskaya, 3, Ulaanbaatar, 14201, Mongolia; gerelbaatar@seas.num.edu.mn

Received on October 18, 2022 / Approved after reviewing on January 12, 2023 / Accepted on January 16, 2023

Abstract. The development of seedling production technology and methods of establishing high-yielding plantations of *Picea obovata* Ledeb. on a scientific basis is one of the urgent problems of forestry in Mongolia. In this study, we aimed to solve the following problems: to conduct a comparative analysis of the seedling growth parameters and biomass accumulation grown on different nutrient substrates; to assess the relationship between seedling growth, biomass accumulation and soil properties; to determine the most optimal nutrient substrates for seedling production of Siberian spruce in greenhouse conditions in Northern Mongolia. Six formulations of nutrient substrates (T1, T2, T3, T4, T5, T6) were used for the seedling production of *Picea obovata* Ledeb. in greenhouses equipped with a sprinkler system. Nutrient substrates were prepared using black soil, manure, compost, peat, sawdust, sand in different composition ratios. During the 4-year-observation period height, root collar diameter, root length and aboveground and belowground biomass of seedlings were measured at the end of each growing season. We divided the biomass of seedlings into several structural elements. We found that all tested nutrient substrates, except the control substrate, had a positive effect on seedling growth in height and diameter. Comparative analyses showed that different ratio and composition of black soil, compost, manure, sawdust, and sand in the nutrient substrate had different effects on seedling growth ($p > 0.001$) and biomass accumulation ($p > 0.001$). Among the proposed nutrient substrates, the treatments T2 (50 % black soil + 20 % sand + 20 % peat + 10 % compost) and T6 (60 % black soil + 20 % sand + 10 % peat + 10 % compost) were selected as the most effective soil substrate that are suitable for further seedling production of Siberian spruce under greenhouse

conditions in Mongolia. There fore, it was observed that good root system development was a determinant of seedling growth in height, diameter, and aboveground biomass accumulation especially from 3–4 years of age. Spruce seedling growth was positively correlated not only with humus content ($r = 0.46$), but also with soil acidity ($r = 0.43$) and available phosphorus ($r = 0.48$). The results of this investigation made an important contribution to the development of production technology for growing standard and large-sized seedlings of *Picea obovata* in greenhouse complexes in Northern Mongolia.

Keywords: biomass, height, diameter, Siberian spruce, Northern Mongolia, nutrient substrate, growth, greenhouse

Acknowledgements: The study was financially supported by National University of Mongolia within the framework of scientific projects No. P2019-3634, P2020-3949 and partially supported by the MJEED project No. J12B18. The authors express their sincere gratitude to the students and workers who helped in the preparation of nutrient substrates and collection of field data.

For citation: Jagdag D., Batsaikhan G., Baatarbileg N., Lobanov A.I., Gerelbaatar S. Effect of Nutrient Substrate on Seedling Growth and Biomass Allocation of *Picea obovata* Ledeb. in Northern Mongolia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 57–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-57-69>

Научная статья

Влияние питательного субстрата на рост и распределение биомассы сеянцев *Picea obovata* Ledeb. в Северной Монголии

Д. Жагдаг¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9237-7627>

Г. Батсайхан², канд. с.-х. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7752-2286>

Н. Баатарбилэг¹, канд. с.-х. наук, проф.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3489-1257>

А.И. Лобанов³, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-8764-2020](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>

С. Гэрэлбаатар⁴, канд. биол. наук, проф.; ResearcherID: [AAK-4597-2021](https://orcid.org/0000-0002-9561-5256),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9561-5256>

¹Институт лесоведения Монгольского государственного университета, ул. Университетская, д. 1, Улан-Батор, Монголия, 14201; jagdag_0301@yahoo.com, baatarbileg@num.edu.mn

²Институт географии и геоэкологии Монгольской академии наук, ул. Баруун сэлбэ, д. 15, Улан-Батор, Монголия, 15170; batlaa_85@yahoo.com

³Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Садовая, д. 5, с. Зеленое, Республика Хакасия, Россия, 655132; anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

⁴Монгольский государственный университет, ул. Университетская, д. 3, Улан-Батор, Монголия, 14201; gerelbaatar@seas.num.edu.mn

Поступила в редакцию 18.10.22 / Одобрена после рецензирования 12.01.23 / Принята к печати 16.01.23

Аннотация. Разработка технологии производства сеянцев и способов создания высокопродуктивных насаждений *Picea obovata* Ledeb. на научной основе является одной из актуальных проблем лесного хозяйства Монголии. Проведен сравнительный анализ показателей роста выращенных на различных питательных субстратах сеянцев ели сибирской и накопления их биомассы. Оценена взаимосвязь между ростом сеянцев, накоплением их биомассы и свойствами почвы. Определены наиболее оптимальные питательные субстраты для выращивания сеянцев в тепличных условиях Северной Монголии. Сеянцы ели сибирской выращивали в теплицах, оборудованных системой дождевания. Применяли 6 видов питательных субстратов: Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6. Питательные субстраты готовили с использованием чернозема, навоза, компоста, торфа, опилок и песка в различных соотношениях. В течение 4-летнего периода наблюдений в конце каждого вегетационного периода измеряли высоту, диаметр корневой шейки, длину корня и определяли надземную и подземную биомассу сеянцев. Биомасса сеянцев разделена на несколько структурных элементов. Установлено, что все испытанные питательные субстраты, за исключением контрольного (Т1), оказали положительное влияние на рост сеянцев в высоту и по диаметру. Сравнительный анализ показал, что различные соотношение и состав чернозема, компоста, навоза, опилок и песка в питательном субстрате по-разному влияют на рост сеянцев ($p > 0,001$) и накопление биомассы ($p > 0,001$). Питательные субстраты Т2 (50 % чернозема + 20 % песка + 20 % торфа + 10 % компоста) и Т6 (60 % чернозема + 20 % песка + 10 % торфа + 10 % компоста) оказались наиболее эффективными, подходящими для дальнейшего производства сеянцев ели сибирской в тепличных условиях Монголии. Отмечено, что хорошее развитие корневой системы было определяющим фактором роста сеянцев в высоту, по диаметру и накопления надземной биомассы, особенно с 3–4-летнего возраста. Рост сеянцев ели положительно коррелировал не только с содержанием гумуса ($r = 0,46$), но и с кислотностью почвы ($r = 0,43$) и доступным фосфором ($r = 0,48$). Результаты этих оценок являются важным вкладом в разработку технологии выращивания стандартных и крупномерных сеянцев *P. obovata* в тепличных комплексах Северной Монголии.

Ключевые слова: биомасса, высота, диаметр, ель сибирская, Северная Монголия, питательный субстрат, прирост, теплица

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Монгольского государственного университета в рамках научных проектов № P2019-3634, P2020-3949 и частично поддержано проектом MJEED № J12B18.

Для цитирования: Жагдаг Д., Батсайхан Г., Баатарбилэг Н., Лобанов А.И., Гэрэлбаатар С. Влияние питательного субстрата на рост и распределение биомассы сеянцев *Picea obovata* Ledeb. в Северной Монголии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 57–69. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-57-69>

Introduction

Forests in Mongolia play an important role in sustainable socio-economic development of the country, ensuring its economic, energy, environmental and food security [2, 42]. They become not only a source of valuable wood resources, but also perform the number of environmental and ecosystem functions, provide ecosystem services to the population, maintain water balance and protect soils from erosion, and conserve biodiversity [1, 35].

Picea obovata Ledeb. in the boreal zone of Russia and Mongolia is one of the main forest-forming tree species of woody plants that geographically distributed from the north of the European part of Russia to the Pacific coast that dominates in dark coniferous forests [22, 39, 44].

Spruce forests in Mongolia basically grow in the northern part of the country coinciding with the distribution of seasonal permafrost soils. However, they mainly grow on the north-facing slopes of the mountains, and along the valleys of small rivers, forming pure and mixed stands. Spruce stands show better growth on loamy, well-drained, and sandy soils [4, 28, 43].

According to statistics [7] a total of 21.1 thousand ha of spruce forests are registered in Mongolia, which occupy only 0.18 % of the country's forest cover. In recent decades, degradation and deforestation of natural spruce forests caused by global warming and unsustainable forest management indicate the importance of intensified forestry measures in these forests. They should be aimed at successful natural regeneration and artificial restoration of these forests using high-quality seedlings produced in the forest nurseries [12, 16].

A number of studies emphasize that success of reforestation depends not only on the site quality and post-planting stress of transplanted seedlings [11, 13, 37], but also on the quality of the seedlings themselves [8, 27, 32, 47] used for planting. Therefore, the size of seedlings and their root system play an important role in plant survival [6, 14, 37, 45, 46].

Several researchers [10, 26, 36] noted that well-developed root systems allow seedlings to overcome transplanting stress, which is usually associated with water deficit [38], and they are able to penetrate the soil faster to use the water and nutrients they need.

Previous studies [3, 5, 6, 21, 28, 32, 33, 40] were basically devoted to the development of seedling production technology and the population ecology of Siberian spruce plantations in the Northern and Eastern Kazakhstan and Central Siberia. It is well-known that Redko et al. [44] developed the bioecological basis for the seedling production of spruce in forest nurseries of the Leningrad region, Russia. Such researches there fore were carried out in Northern Mongolia [15, 16]. Some studies emphasized that the use of various fertilizers and growth stimulants [19, 20, 45] had a positive effect on seedling growth of coniferous tree species.

A number of researchers [21, 22, 29] emphasized that the use of various fertilizers and growth stimulants had a positive effect on the growth of seedlings of coniferous trees. Comparative growth analyses of seedling growth for Siberian spruce planted in greenhouse conditions on various soil substrates consisting of soil, humus, peat, sawdust, and sand in Northern and Eastern Kazakhstan were carried out. However, the comparative assessment on individual seedling growth performance, biomass accumulation and morphological parameters of Siberian spruce in relation to different nutrient substrates under the conditions of Mongolia has not been previously studied.

In this study, we purposed to detect different effects of nutrient substrates from organic origin on growth, development, and biomass accumulation of seedlings of *Picea obovata* in greenhouse conditions of Northern Mongolia.

The aim of this study was to 1) conduct a comparative analyses of seedling growth performance and biomass accumulation in relation to different nutrient substrates, 2) assess the relationships between seedling growth and soil properties, 3) select the most optimal nutrient substrate for seedling production of *Picea obovata* in the greenhouse conditions of Northern Mongolia.

Research objects and methods

Characteristics of the study area. This study was carried out on an experimental forest nursery (47°59' N, 106°57' E) established on loamy black soils, which formed on

alluvial deposits. According to Forest-vegetation zoning [30], the study area belongs to the East Khentii province of the South-Transbaikalia Forest – vegetation zone. The climate in the study area is sharply continental: the annual mean air temperature is -3.5 °C, and annual rainfall is 240 mm, 89.2 % of the rainfall falls during the vegetation season, which lasts 125 days a year [34]. The soils in the study area are mainly represented by seasonally frozen black soil and urbanozem [18, 25].

Preparation of different nutrient substrates. Organic substances readily available in the study area were used for the preparation of different nutrient substrates. For a comparative assessment and preparation of different soil treatments, we used black soil, sand, sawdust, peat, manure, and compost in different proportions. Therefore, we used compost originated from cow manure and plant waste to increase organic matter in the nutrient substrate.

The soil chemical properties were determined using well-known methods of soil analyses [13–16].

The content of chemical elements in nutrient substrates was determined according to OST 56-98-93. Here we determined alkaline-hydrolysable nitrogen and pH according to Kornfeld M. GOST 26483–85, TSINAO and GOST 27784–88. Content of available phosphorus, potassium and ash content was determined according to Kirsanov.

Experimental design and statistical analyses. Experimental planting was carried out in greenhouses equipped with a sprinkler system using high quality and stratified seeds of *Picea obovata*, collected from natural spruce stands distributed in the Western Khentii mountains. Seed sowing was conducted in the first decade of 2018, when the soil temperature exceeded 9 °C at the topsoil. In accordance with recommendation of scientists [9], the seeds were sown to a depth of 0.6 cm, and then mulched with a thin layer (1.0–1.5 cm) of sawdust.

Agrotechnical measures including irrigation ($6\text{--}10$ l/m² or $60\text{--}100$ m³·ha⁻¹), weeding and soil loosening were performed annually as needed.

To monitor the growing environment interior greenhouses, the temperature and humidity of the air and soil were continuously measured. The air and soil temperature were measured with mercury and Savinov thermometer, respectively. The daily course of air temperature was recorded by M-16A thermographs, the relative air humidity was determined by aspiration psychrometers MV-4M, and its daily course by M-21A hygrographs.

The morphological parameters (stem height, root neck diameter, length of tap and lateral roots) and biomass (needle, stem, root biomass) were determined annually at the third decade of September from 2018 to 2021 on 83–84 individuals from each treatment to compare the effects of different soil substrates on growth and root development of seedlings.

The stem height and root collar diameter were measured using a metal ruler and an Electronic Digital Caliper – G06064731 with an accuracy of 0.1 cm and 0.1 mm, respectively. To determine the biomass of seedlings, the roots were separated from the soils and washed. The entire biomass of seedlings was divided into stem, needle, tap and lateral roots, and oven-dried in an oven at 75 °C for 72 hours to constant weight. Fresh and dry biomass was weighted using electronic balance (ML 02-11) with an accuracy of 0.001 g.

Statistical analyses were performed using Microsoft Excel and One-Way Analyses of Variance. The Pearson correlation coefficient was used to reflect the linear correlation of independent variables, as well as the Duncan multiple range test (DMRT) was used to measure specific differences between pairs of means and select the most optimal experimental treatments.

Results and discussion

Main chemical properties and component of nutrient substrates for experimental planting of spruce seedlings were illustrated in the previously published article Jagdag et al. [6] using following abbreviations of components: BS – black soil; S – sand; SD – sawdust; C – compost; M – manure; P – peat. In nutrient substrate T1 treatment consists of only BS(100). Therefore, T2, T3, T4 and T5 treatments had following compositions as BS(50)S(20)P(20)C(10), BS(50)S(20)SD(20)M(10), BS(40)S(20)SD(20)M(20), DS(30)S(20)SD(30)M(20) and DS(60)S(20)P(10)C(10), respectively. Here, the percentage of each component in the nutrient substrate is indicated in parentheses.

Jagdag et al. [16] reported that all these nutrient substrates showed a weak alkalinity, close to neutral, and a fairly high nutrient content, and T2 and T6 treatments contained the highest amount of nutrients compared to the control (T1).

Growth performance of seedlings in different nutrient treatments. In our study, successful seed germination was observed in soils with temperatures ranging from 18 to 28 °C. Meanwhile, we also found a high variation in height ($p > 0.001$), root collar diameter ($p > 0.001$) for seedlings of Siberian spruce in relation to different soil properties and is tended to increase with age [16].

The fastest growth in height and diameter was observed in T6 and T2 treatments, where the ratio of black soil, sand, peat and compost in nutrient substrates was 6:2:1:1 and 5:2:2:1, respectively (Fig. 1 *a, b*).

Meanwhile, a slower growth of seedlings was recorded on T1 (only black soil) and T5 (30 % black soil + 20 % sand + 30 % sawdust + 20 % manure) treatments. In addition, such a weak growth and poor development of the root systems can be associated with a rather high content of undecomposed and semi-decomposed organic substances.

According to Duncan's multiple tests, the fastest growth in the length of the taproots and the number of lateral roots were recorded in T6 and T2 treatments, where the ratio of the volumes of black soil, sand, peat and compost in soil substrates was 6:2:1:1 and 5:2:2:1, respectively (Fig. 1 *c, d, e*).

At the age of 3 years seedlings growing on T1 soil substrates reached their standard sizes (stem height 10 cm; root neck diameter 2 mm). For example, seedling height and root neck diameter for seedlings, growing on T2 and T6 was exceeded by 22.8 and 14.1 % compared to standard size, respectively [16].

The experience from other studies [28, 31] suggests using the large-sized 4 years-old seedlings of Siberian spruce to establishment the forest plantations, which allows to significantly reduce silvicultural measures associated with post-planting survival and seedling growth.

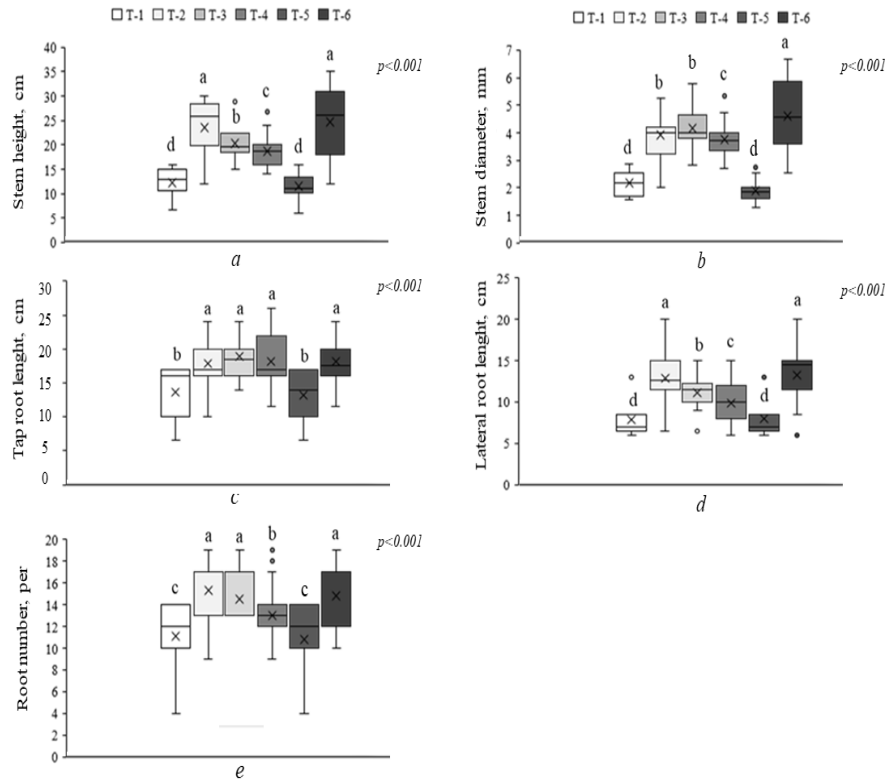


Fig. 1. Comparison of the biometric parameters of *Picea obovata*, grown on different nutrient substrates. Differences between pairs of mean values according to Duncan: *a* – maximum value; *d* – minimum value; *b*, *c* – transitional values between *a* and *d*

In our study, T2 and T6 nutrient substrates had a greater positive effect on seedling growth and biomass accumulation among treatments. In comparison, seedlings growing on these soil substrates showed 2 times faster growth in height (91.9 and 100 %) and diameter (77.3 and 109.1 %) compared to control treatment [6]. Overall, all these substrates resulted a better seedling growth compared to control treatments in our study. It can be concluded that the adding organic substances such as sawdust, peat, manure, and compost significantly improves not only the soil nutrient regime, but also its physical properties, including aeration and water-holding capacity of the soils.

Accumulation and distribution of biomass by their structural components. We found a high variation in aboveground and belowground biomass accumulation ($p > 0.001$), which is caused by seedling age and nutrient properties. The dynamics of the aboveground and belowground biomass accumulation of seedlings over the observation period is presented in Table 1.

In terms of biomass accumulation, during the first 2 years a relatively faster biomass production of above-ground part than of belowground part was observed (Table 1).

Table 1

**Accumulation of above- and belowground biomass of spruce seedlings
over a 4-year observation period**

Treatment	Number of samples	Seedling age, year					
		2		3		4	
		AGB	BGB	AGB	BGB	AGB	BGB
T1	250	0.042± ±0.038 (100)	0.025± ±0.024 (100)	0.355± ±0.222 (100)	0.150± ±0.113 (100)	2.182± ±0.377 (100)	0.736± ±0.088 (100)
T2	250	0.046± ±0.041 (109.5)	0.028± ±0.024 (112)	0.411± ±0.231 (115)	0.174± ±0.115 (116)	4.391± ±1.587 (201.2)	1.312± ±0.413 (178.3)
T3	250	0.042± ±0.038 (100)	0.025± ±0.024 (100)	0.356± ±0.222 (100.3)	0.151± ±0.113 (100.7)	4.004± ±0.846 (183.5)	1.105± ±0.258 (150.1)
T4	250	0.042± ±0.038 (100)	0.025± ±0.024 (100)	0.353± ±0.222 (99.4)	0.144± ±0.113 (96)	3.301± ±0.981 (151.3)	0.954± ±0.243 (129.6)
T5	250	0.045± ±0.039 (107)	0.025± ±0.024 (100)	0.350± ±0.222 (98.6)	0.150± ±0.113 (100)	2.146± ±0.389 (98.3)	0.726± ±0.094 (98.6)
T6	250	0.050± ±0.042 (119)	0.030± ±0.025 (120)	0.418± ±0.232 (117.8)	0.179± ±0.116 (119.3)	4.398± ±1.697 (201.6)	1.342± ±0.439 (182.3)

Note: AGB – aboveground biomass, g; BGB – belowground biomass, g. The denominator (in parenthesis) indicates % relative to the control.

A similar picture was reported by Siberian scientists from the studies in southern taiga of the Krasnoyarsk territory [20]. Since the age of 3 and 4, there was observed an accelerated growth and predominance of aboveground biomass in total biomass. In above- and belowground ratio, we found that percentage of aboveground biomass tended to increase with seedling ages (Table 2).

Table 2

Dynamics of root/shoot ratio in different ages of spruce seedlings

Treatment	Seedling age, year		
	2	3	4
T1	0.59	0.42	0.33
T2	0.60	0.42	0.30
T3	0.59	0.42	0.28
T4	0.59	0.40	0.29
T5	0.56	0.43	0.34
T6	0.60	0.42	0.31

Among these substrates the greatest positive and statistically significant effect on biomass accumulation of seedlings (*Picea obovata*) belonged to the nutrient substrates, where compositions were 6:2:1:1 (T2) and 5:2:2:1 (T6), respectively (Fig. 2).

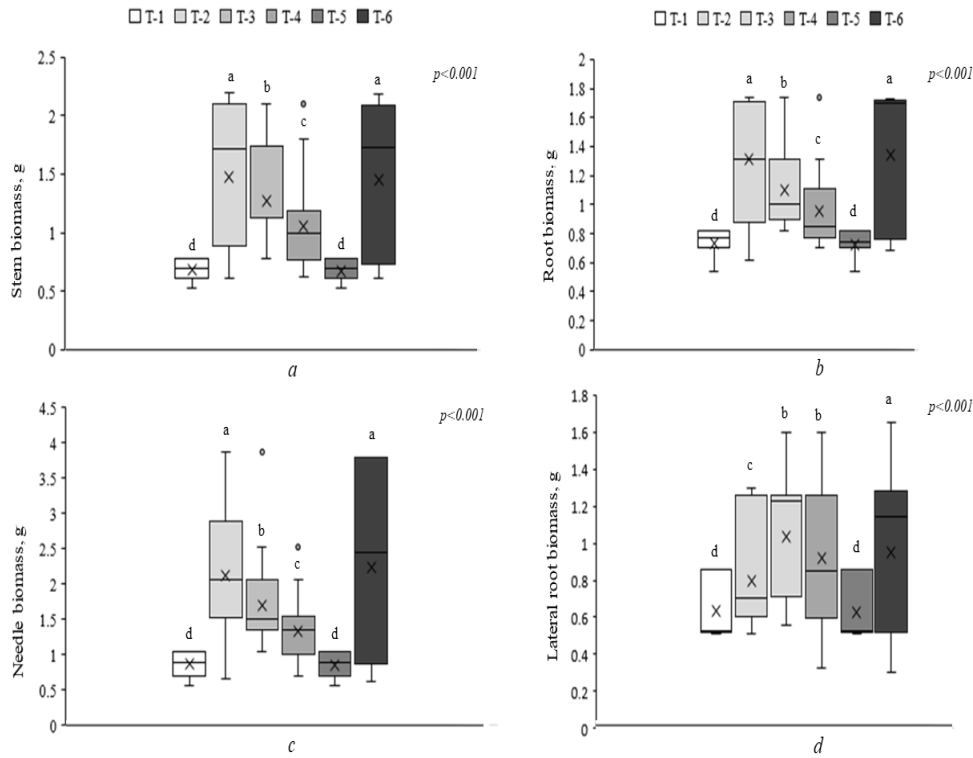


Fig. 2. Distribution of the biomass of seedlings by structural components grown on various nutrient substrates

Relationships between growth and soil properties. The correlation matrix between morphological and soil chemical properties for seedlings of Siberian spruce is illustrated in Table 3.

Table 3

Correlation matrix between morphological and nutrient chemical properties for seedlings of Siberian spruce

Variables	Height, cm	Diameter, mm	Number of roots, pcs	Main root length, cm	Biomass, g			pH	Humus, %	P ₂ O ₅	K ₂ O
					stem	root	needle				
Height, cm	1										
Diameter, mm	0.952	1									
Number of roots, pcs	0.954	0.938	1								
Main root length, cm	0.867	0.963	0.908	1							
Stem biomass, g	0.979	0.939	0.993	0.888	1						
Root biomass, g	0.985	0.910	0.970	0.824	0.990	1					
Needle biomass, g	0.961	0.871	0.864	0.722	0.909	0.950	1				
pH	-0.335	-0.278	-0.413	-0.138	-0.389	0.432	0.450	1			
Humus, %	-0.334	0.461	-0.209	0.466	-0.217	-0.186	-0.244	-0.426	1		
P ₂ O ₅	0.119	0.328	0.350	0.479	0.259	0.149	-0.020	-0.305	0.189	1	
K ₂ O	-0.045	0.033	0.143	0.051	0.080	0.050	-0.013	-0.723	0.644	0.694	1

Table 3 showed that the growth of spruce seedlings positively correlated with not only to humus content ($r = 0.46$), but also with nutrient acidity ($r = 0.43$) and available phosphorus ($r = 0.48$). Furthermore, correlation matrix demonstrated that seedling growth strongly dependent on development of the root system and its biomass accumulation.

Conclusion

The production of standard and large-sized Siberian spruce seedlings under typical conditions is the most effective way to meet the existing need for high-quality planting material for the restoration of spruce forests in Northern Mongolia. It is shown that the different ratio and composition of nutrient substrates consisting of black soil with the addition of sand, peat and compost have different effects on the growth of seedlings ($p > 0.001$) and biomass accumulation ($p > 0.001$). Meanwhile, the growth of spruce seedlings positively correlated not only with humus content ($r = 0.46$), but also with soil acidity ($r = 0.43$) and available phosphorus ($r = 0.48$). Among tested soil substrates the treatments T2 (50 % black soil + 20 % sand + 20 % peat + 10 % compost) and T6 (60 % black soil + 20 % sand + 10 % peat + 10 % compost) were selected as the most effective soil substrate that suitable (improved nutrients and aeration) for further seedling production of Siberian spruce. These selected nutrient substrates are recommended for mass production of *Picea obovata* Ledeb. seedling in greenhouse conditions of Northern Mongolia. The results of the research can be used to develop an industry standard for seedlings and seedlings of coniferous species for Northern Mongolia.

REFERENCES

1. Babushkina E.A., Belokopytova L.V., Zhirnova D., Barabantsova A., Vaganov E. Divergent Growth Trends and Climatic Response of *Picea obovata* along Elevational Gradient in Western Sayan Mountains, Siberia. *Journal of Mountain Science*, 2018, vol. 15, iss. 11, pp. 2378–2397. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4974-6>
2. Bat-Erdene J., Dashzeveg Ts., Dugarjav Ch., Odgerel O., Lobanov A.I., Gerelbaatar S., Erdenekhüleg D. Reforestation and Culture. *Forests of Mongolia: Forest Ecosystems of the Khubsugul Region, Dynamics, Renewal and Biological Diversity*, 2018, vol. 5, pp. 204–233. (In Mongolian).
3. Bauer V.V. *Technology of Growing Forest Crops with Large-Sized Planting Material in the Conditions of the Kazakhstan Altai*: Cand. Agr. Sci. Diss. Abs. Sverdlovsk, LTI Publ., 1991. 22 p. (In Russ.).
4. Bezrukova E.V., Abzaeva A.A., Letunova P.P., Kulagina N.V., Vershinin K.E., Belov A.V., Orlova L.A., Danko L.V., Krapivina S.M. Post-glacial History of Siberian Spruce (*Picea obovata*) in the Lake Baikal Area and the Significance of this Species as a Paleo-Environmental Indicator. *Quaternary International*, 2005, vol. 136, iss. 1, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.11.007>
5. Bobrinev V.P., Park L.N., Bانشchikova E.A. Agricultural Technology of Cultivation of Siberian Spruce Seedlings in the Trans-Baikal Territory. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 3, pp. 70–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.70>
6. Butorova O.F. *Bioecological Bases for Growing Seedlings and Forest Crops in Eastern Siberia*: Doc. Agr. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, KGTA Publ., 1996. 44 p. (In Russ.).

7. Center for Forest Research and Development (CFRD). *Report on Forest Resources of Mongolia*. Ulaanbaatar, 2020. 46 p. (In Mongolian).
8. Dashzeveg Ts. *Scientific Basis for the Restoration of Coniferous Forests in Mongolia*. Ulaanbaatar, Sogoo Nur Publ., 2014. 224 p. (In Mongolian).
9. Dashzeveg Ts., Amartuvshin S. Results of the Assessments on Seedling Production for *Pinus sibirica* (Rupr.) Mayr. and *Picea obovata* Ledeb. *Proceedings of Mongolian Academy of Sciences*, 2012, vol. 52, iss. 2, no. 202, pp. 12–19.
10. David T.S., Pinto C.A., Nadezhdina N., David J.S. Water and Forests in the Mediterranean Hot Climate Zone: A Review Based on a Hydraulic Interpretation of Tree Functioning. *Forest Systems*, 2016, vol. 25, iss. 2, pp. 1–14. <https://doi.org/10.5424/fs/2016252-08899>
11. Drössler L., Agestam E., Bielak K., Dudzinska M., Koricheva Ju., Liziniewicz M., Löf M., Mason B., Pretzsch H., Valkonen S., Wellhausen K. Over- and Underyielding in Time and Space in Experiments with Mixed Stands of Scots Pine and Norway Spruce. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 8, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/f9080495>
12. Gerelbaatar S., Batsaikhan G., Tsogtbaatar J., Battulga P., Baatarbileg N., Gradel A. Assessment of Early Survival and Growth of Planted Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings under Extreme Continental Climate Conditions of Northern Mongolia. *Journal of Forestry Research*, 2020, vol. 31, iss. 1–2, pp. 13–26. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00935-8>
13. 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. 893. <https://doi.org/10.14214/sf.893>
14. Iakovoglou V., Takos I., Pantazi G., Pipsou A., Neofotistou M. Growth Responses of Seedlings Produced by Parent Seeds from Specific Altitudes. *Journal of Forest Research*, 2020, vol. 31, iss. 6, pp. 2121–2127. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01030-8>
15. Jagdag D., Batsaikhan G., Baatarbileg N., Naranbayar E., Ganbat D., Bayartulga A., Gerelbaatar S. A Comparative Study of the Seedling Production Technology of *Picea obovata* Ledeb. in the Forest-Steppe Ecotone of Northern Mongolia. *Proceeding of the Mongolian Academy of Science*, 2021, vol. 61, no. 03(239), pp. 36–43. <https://doi.org/10.5564/pmas.v61i03.1821>
16. Jagdag D., Lobanov A.I., Baatarbileg N., Gerelbaatar S., Batsaikhan G. Agrotechnics for Growing Large-Sized Planting Material *Picea obovata* Ledeb. in Greenhouse Complexes in Mongolia. *Proceedings of the Interuniversity International Congress* (Moscow, June 9, 2022). Moscow, Infiniti Publ., 2022, pp. 190–201.
17. Johansson K., Nilsson U., Allen H.L. Interactions between Soil Scarification and Norway Spruce Seedling Types. *New Forests*, 2007, vol. 33, no. 1, pp. 13–27. <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9010-y>
18. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Sorokina O.I., Basha S.N., Gunin P.D., Enkh-Amgalan S. Ecological-geochemical State of Soils in Ulaanbaatar (Mongolia). *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 7, pp. 709–721. <https://doi.org/10.1134/S106422931107009X>
19. Kim J.K., Shawon M.R.A., An J.H., Yun Y.J., Park S.J., Na J.K., Choi K.Y. Influence of Substrate Composition and Container Size on the Growth of Tissue Culture Propagated Apple Rootstock Plants. *Agronomy*, 2021, vol. 11, iss. 12, art. 2450. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122450>
20. Kirienko M.A., Goncharova I.A. The Prolonged Influence of Growth Stimulants on Morphometric Indicators of Three-Year Seedlings of Main Forest Forming Species of Central Siberia. *Siberian Journal of Forest Science*, 2018, no. 1, pp. 65–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20180107>
21. Kogan A.M., Mosin V.I. Growing Seedlings of Coniferous Species in Greenhouses with Polyethylene Coating in the Rudny Altai. Problems of Reforestation in the Taiga Zone of the USSR. *Proceedings of the All-Union Conference*. Krasnoyarsk, ILiD SO AN SSSR Publ., 1988, pp. 112–113. (In Russ.).

22. Kogan V.N., Kogan A.M. Cultivation of Large-sized Seedlings with a Closed Root System in the Taiga Zone of East Kazakhstan. Problems of Reforestation in the Taiga Zone of the USSR. *Proceedings of the All-Union. Conference*. Krasnoyarsk, ILiD SO AN SSSR Publ., 1988, pp. 113–115. (In Russ.).
23. Kopytkov V.V. Development of Organomineral Composts for Growing Forest Planting Material. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 3, pp. 380–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-3-380-384>
24. Koropachinsky I.Yu., Potemkin O.N., Rudikovskiy A.V., Kuznetsova E.V. Polymorphism and Population Structure of the Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) at the Northern Limit of the Species Distribution. *Contemporary Problems of Ecology*, 2012, no. 5, pp. 127–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1995425512020084>
25. Krasnoshchekov Yu.N. *Soil Cover and the Soils of Mountain Forests in Northern Mongolia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 196 p. (In Russ.).
26. Korotkov I.A., Tsedendash G., Yanovsky V.M., Gall J., Ogorodnikov A.V. *Map of the Forests of the Mongolian People's Republic (Scale 1:1500000)*. Moscow, GUGK MPR & GUGK USSR Publ., 1983. (In Russ.).
27. Lambers H., Shane M.W., Cramer M.D., Pearse S.J., Veneklaas E.J. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching Morphological and Physiological Traits, *Annals of Botany*, 2006, vol. 98, iss. 4, pp. 693–713. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl114>
28. Langvall O., Örlander G. Effects of Pine Shelterwoods on Microclimate and Frost Damage to Norway Spruce Seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 31, no. 1, pp. 155–164. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-1-155>
29. Lyuminarskaya M.A., Varaksin G.S. *Siberian Spruce Cultures in the Southern Taiga, and Forest-Steppe Regions of the Krasnoyarsk Territory*. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2010. 130 p. (In Russ.).
30. Makarenko V.Ya., Sosnin N.A., Yamaleev M.M. *Recommendations for the Accelerated Cultivation of Seedlings of the Main Tree Species in Greenhouses with Synthetic Coating in Northern and Eastern Kazakhstan*. Alma-Ata, KazNIIKha Publ., 1979. 22 p. (In Russ.).
31. Maslenkov P.G. *Evaluation of Different Methods of Reforestation. Formation of Forest Ecosystems under Conditions of Intensive Forest Exploitation*. Novosibirsk, Siberian Enterprise RAN Publ., 1998, pp. 138–158. (In Russ.).
32. Matveeva R.N., Butorova O.F. *Peculiarities of Growing Planting Material and Coniferous Forest Cultures in Eastern Siberia*. Krasnoyarsk, KGTA Publ., 1997. 200 p. (In Russ.).
33. Matveeva R.N., Nevzorov V.N., Butorova O.F. *Recommendations for Growing Coniferous Seedlings in Eastern Siberia*. Krasnoyarsk, KGTA Publ., 1996. 26 p. (In Russ.).
34. *Meteorological Reference Book of People's Republic of Mongolia*. Ulaanbaatar, 1971, vol. 1. 319 p. (In Mongolian).
35. Ministry of Environment and Tourism. Mongolia's Forest Reference Level Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *UN-REDD Mongolia National Program*. Ulaanbaatar, Mongolia, 2018. 218 p.
36. Mitchell P.J., Veneklaas E.J., Lambers H., Burgess S.S.O. Leaf Water Relations During Summer Water Deficit: Differential Responses in Turgor Maintenance and Variation in Leaf Structure among Different Plant Communities in South-Western Australia. *Plant Cell Environment*, 2008, vol. 31, iss. 12, pp. 1791–1802. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01882.x>
37. Nilsson O., Hjelm K., Nilsson U. Early Growth of Planted Norway Spruce and Scots Pine after Site Preparation in Sweden. *Scandinavian Journals of Forest Research*, 2019, vol. 34, iss. 8, pp. 678–688. <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1659398>
38. Nzokou P., Cregg B.M. Morphology and Foliar Chemistry of Containerized *Abies frosseri* (Pursh) Poir. Seedlings as Affected by Water Availability and Nutrition. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, iss. 6, art. 602. <https://doi.org/10.1051/forest/2010015>

39. Peterson L.K., Bergen K.M., Brown D.G., Vashchuk L., Blam Y. Forested Land-Cover Patterns and Trends over Changing Forest Management Eras in the Siberian Baikal Region. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 257, iss. 3, pp. 911–922. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.037>
40. Pogosova N.P., Safronova G.P. Growing Seedlings of Siberian Spruce. *Forestry*, 1980, no. 9, pp. 31–33. (In Russ.).
41. Redko G.I., Ogievsky D.V., Nakvasina E.N., Romanov E.M. *Bioecological Bases for Growing Pine and Spruce Seedlings in Nurseries*. Moscow, Lesnaya promslennost' Publ., 1983. 64 p. (In Russ.).
42. Regdel D., Dugarjav Ch., Gunin P.D. Ecological Demands to Social-Economic Development of Mongolia under Climate Aridization. *Arid Ecosystems*, 2012, vol. 2, pp. 1–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2079096112010076>
43. Shimanyuk A.P. *Biology of Trees and Shrubs of the USSR*. Moscow, Uchpedgiz Publ., 1957. 333 p. (In Russ.).
44. Stavrova N.I., Gorshkov V.V., Katjutin P.N., Bakka I.Ju. The Structure of Northern Siberian Spruce–Scots Pine Forests at Different Stages of Post-Fire Succession. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 5, art. 558. <https://doi.org/10.3390/f11050558>
45. Sutton R. Planting Stock Quality, Root Growth Capacity, and Field Performance of Three Boreal Conifers. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1987, vol. 17, no. 8, pp. 794–804.
46. Wagner R.G., Robinson A.P. Critical Period of Interspecific Competition for Four Northern Conifers: 10-Year Growth Response and Associated Vegetation Dynamics. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 36, no. 10, pp. 2474–2485. <https://doi.org/10.1139/x06-058>
47. Wallertz K., Björklund N., Hjelm K., Petersson M., Sundblad L.-G. Comparison of Different Site Preparation Techniques: Quality of Planting Spots, Seedling Growth and Pine Weevil Damage. *New Forests*, 2018, no. 49, pp. 705–722. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9634-8>

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*52

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-70-80

Возрастная динамика нормальных древостоев ольхи серой в таежной зоне северо-востока европейской части России

С.В. Третьяков^{1,2}, гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

С.В. Коптев^{1,2}, гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

А.А. Карaban^{1,2}✉, лаборант-исследователь, аспирант; ResearcherID: [HWP-3629-2023](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

А.А. Парамонов¹, мл. науч. сотр., канд. с.-х. наук; ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

А.В. Давыдов^{1,2}, лаборант-исследователь, аспирант; ResearcherID: [ABE-1939-2021](https://orcid.org/0000-0003-4328-7040),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4328-7040>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, karaban@sevniilh-arh.ru✉, a.paramonov@sevniilh-arh.ru, davydov.a@edu.narfu.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, karaban@sevniilh-arh.ru✉, davydov.a@edu.narfu.ru

Поступила в редакцию 01.08.21 / Одобрена после рецензирования 09.11.21 / Принята к печати 13.11.21

Аннотация. Для организации, планирования и ведения лесного хозяйства на научной основе в насаждениях с преобладанием и участием ольхи серой (*Alnus incana* (L.) Moench), сформировавшихся в условиях таежной зоны, необходимы достоверные данные о строении, росте и продуктивности древостоев. В настоящее время ощущается острая необходимость в разработке таблиц хода роста для насаждений ольхи серой, так как площади, занятые этой породой, значительно увеличились в результате зарастания заброшенных сельскохозяйственных угодий. Разработка единой системы нормативных и справочных материалов для учета количества, оценки состояния и объема использования насаждений ольхи серой на Европейском Севере России является важной и актуальной задачей. Таблицы хода роста для нормальных древостоев ольхи серой в таежной зоне северо-востока европейской части России ранее не разрабатывались. Цель данного исследования – изучение возрастной динамики нормальных древостоев ольхи серой и составление таблиц хода роста. Использованы 193 модельных дерева ольхи серой, а также данные 175 пробных площадей. Полнота – 1,0. Получены уравнения для определения средней высоты, диаметра и запаса насаждений по классам бонитета. На основе уравнений разработаны таблицы хода роста нормальных древостоев по классам бонитета. Предложенные таблицы будут способствовать повышению точности таксации лесов, дадут возможность объективно оценить лесосырьевые ресурсы наиболее представленных древостоев, прогнозировать их рост при выполнении комплекса работ по охране, защите и воспроизводству лесных ресурсов, повышению экологических функций леса, а также контролировать ведение хозяйства в древостоях.

© Третьяков С.В., Коптев С.В., Карaban А.А., Парамонов А.А., Давыдов А.В., 2023

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

Ключевые слова: ольха серая, таблицы хода роста, оценка лесосырьевых ресурсов, таксация насаждений, модели связи, таежная зона Европейского Севера России

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственных заданий ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства, регистрационные номера тем: 123022800113-9; 123030700068-8; 123022800118-4.

Для цитирования: Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Парамонов А.А., Давыдов А.В. Возрастная динамика нормальных древостоев ольхи серой в таежной зоне северо-востока европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 70–80. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-70-80>

Original article

Age Dynamics of Normal Gray Alder Stands in the Taiga Zone of the North-East of the European Part of Russia

Sergey V. Tretyakov^{1,2}, Leading Research Scientist, Doctor of Agriculture, Prof.;

ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Sergey V. Koptev^{1,2}, Leading Research Scientist, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Alexey A. Karaban^{1,2}, Laboratory Assistant-researcher, Postgraduate Student;

ResearcherID: [HWP-3629-2023](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

Andrey A. Paramonov¹, Junior Research Scientist, Candidate of Agriculture;

ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Alexander V. Davydov^{1,2}, Laboratory Assistant-researcher, Postgraduate Student;

ResearcherID: [ABE-1939-2021](https://orcid.org/0000-0003-4328-7040), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4328-7040>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, karaban@sevniilh-arh.ru[✉], a.paramonov@sevniilh-arh.ru, davydov.a@edu.narfu.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, karaban@sevniilh-arh.ru[✉], davydov.a@edu.narfu.ru

Received on August 1, 2021 / Approved after reviewing on November 9, 2021 / Accepted on November 13, 2021

Abstract. In order to organize, plan and conduct forest management on a scientific basis in stands with predominance and participation of gray alder (*Alnus incana* (L.) Moench), formed in the conditions of the taiga zone, reliable data on the structure, growth and productivity of stands are needed. At present, there is an urgent need to develop growth progress tables for gray alder stands, as the areas occupied by this species have significantly increased as a result of abandoned agricultural lands overgrowth. The development of a unified system of regulatory and reference materials for accounting the number, assessment of the condition and volume of use of stands of gray alder in the European North of Russia is an important and urgent task. Growth progress tables for normal gray alder stands located in the taiga zone of the north-east of the European part of Russia have not been developed by anyone before. The purpose of this research is to study the age dynamics of normal gray alder stands to compile growth progress tables. We used 193 model trees of gray alder, as well as data from 175 sample plots. As a research result for the growth progress tables with relative stands density of 1.0 we obtained the equations for determining the average height, diameter, and stands

stock by bonity classes. On the basis of the obtained equations, the tables of growth progress of normal stands by bonity classes were developed. The proposed tables will contribute to improving the accuracy of forest inventory, will give the opportunity to objectively assess the forest resources of the most represented stands, to forecast their growth when performing a set of works on the protection, conservation, and reproduction of forest resources, improving the ecological functions of the forest, as well as to control management in stands.

Keywords: gray alder, growth progress tables, assessment of forest resources, plantation inventory, communication models, taiga zone of the European North of Russia

Acknowledgements: The publication was prepared according to the results of the research work carried out within the framework of the state assignments of the Federal Forestry Agency of the Northern Research Institute of Forestry for applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency, registration numbers of topics: 123022800113-9; 123030700068-8; 123022800118-4.

For citation: Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Paramonov A.A., Davydov A.V. Age Dynamics of Normal Gray Alder Stands in the Taiga Zone of the North-East of the European Part of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 70–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-70-80>

Введение

Ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench) – значимый ресурсный вид, интерес к которому в последние годы существенно вырос [1–4, 6]. Древесина ольхи серой имеет коммерческую ценность в качестве топлива, используемого при копчении продуктов, подходит для столярных и токарных работ. Она имеет ряд преимуществ, являясь плантационной культурой с коротким оборотом рубки [15, 21]. В настоящее время ольха все чаще рассматривается как сырье для производства древесной биомассы [11, 13, 16–18], а также как потенциальный альтернативный вид для лесовосстановления [15]. Ольха серая может использоваться для восстановления нарушенных участков, включая вышедшие из оборота карьеры, укрепления грунта во влажных лесах, на берегах рек и на неустойчивых склонах, подходит для посадки на загрязненных участках [19].

Ольха серая – пионерный вид деревьев, быстрорастущий в молодом возрасте и способный к регенерации из пней и корневищ, хорошо адаптированный к различным условиям произрастания, преобладает в умеренных и бореальных регионах [12, 20]. Входит в число лесообразующих пород Архангельской области. По данным лесоустройства, вид встречается в большинстве лесничеств региона, однако наибольший удельный вес среди них занимают Архангельское, Онежское, Приозерное, Шенкурское, Вельское, Няндомское и Каргопольское лесничества [7, 8].

Для ведения научно обоснованного лесного хозяйства необходимо знать закономерности роста и развития древостоев. В связи с этим исследования хода роста деревьев и насаждений проводились со времен становления лесной отрасли. Конечный практический результат данной научной деятельности – таблицы хода роста [5]. Хорошо обоснованные таблицы хода роста, правильно отражающие изменение основных таксационных элементов с возрастом, являются надежным справочным пособием при решении ряда лесохозяйственных вопросов: определении относительной полноты древостоев, запаса и прироста при глазомерной таксации и дешифрировании данных дистанционного зондирования лесных насаждений. Эти таксационные нормативы сокращают объем наземных лесоустроительных работ, используются при планировании ухода за лесом и других лесохозяйственных мероприятий.

Анализ лесотаксационных справочников бывших союзных республик СССР, в которых приведены нормативы для ольхи серой, показывает, что все они в основном разрабатывались для условий широколиственных лесов средней полосы России, Белоруссии и Украины [9, 10]. Различные методические подходы при составлении таблиц хода роста сероольшаников Латвии, Белоруссии, Псковской области не дают возможности детально сравнить возрастную динамику морфоструктуры древостоев ольхи серой в разных регионах. Исходя из вышеизложенного, для сероольховых древостоев таежной зоны Европейского Севера России необходима разработка таблиц хода роста.

Объекты и методы исследования

Сбор полевого материала для разработки таблиц хода роста проводился в Приморском, Красноборском и Каргопольском районах Архангельской области. Территория исследования относится к северо-таежному и среднетаежному лесотаксационным подрайонам, к таежной зоне и включает в себя северо-таежный район европейской части Российской Федерации и Двинско-Вычегодский таежный район (в соответствии с приказом Минприроды России от 18.08.2014 № 367 (ред. от 19.02.2019) «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации»).

Исследованы 175 пробных площадей и 193 модельных дерева. Полевые и камеральные работы на пробных площадях проводили в соответствии с ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные». Пробные площади распределились по классам бонитета следующим образом: Ia – 12, I – 75, II – 52, III – 22, IV – 14. Модельные деревья брали на каждой пробной площади в количестве 1–2 шт. У каждого модельного дерева фиксировали диаметры в коре на относительных высотах на десятых долях длины ствола. Использовали принятые в лесной таксации методы. По диаметрам в коре для каждого модельного дерева вычисляли объем ствола по формуле среднего сечения. По объемам стволов в коре устанавливали старое видовое число для характеристики формы ствола. На относительных высотах измеряли также прирост диаметра по 5-летиям. Модельные деревья служили критерием отнесения к одному естественному ряду. При отклонении значений коэффициента формы более чем на 6 % пробные площади отбрасывали. Отбирали пробные площади, у которых средние высоты не отклонялись более чем на 10 %, а средние диаметры – более чем на 15 %, пробные площади с большими отклонениями исключали из ряда данных. Диапазон высот был взят по материалам пробных площадей и обмеренным модельным деревьям. Для составления таблиц хода роста применяли метод ЦНИИЛХ, разработанный в Центральном научно-исследовательском институте лесного хозяйства под руководством профессора Н.В. Третьякова.

Результаты исследования и их обсуждение

Таблицы хода роста создавались по бонитетам с учетом типа леса. Для исследования процесса формирования насаждений по высоте при различных бонитетах были взяты модельные деревья. После подбора бонитировочной шкалы все пробные площади распределены по типам леса и классам бонитета. Для основных показателей таблиц хода роста получены математические уравнения связи (табл. 1).

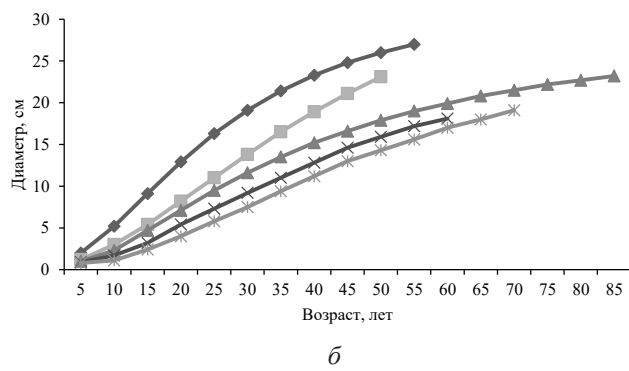
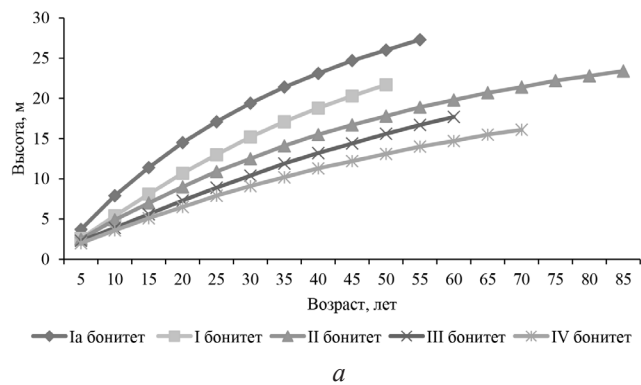
Таблица 1

Связь основных таксационных показателей ольхи серой разного класса бонитета с возрастом древостоя
Correlation between main taxation indices of gray alder of different bonity classes and age

Класс бонитета	Уравнение связи	Диапазон независимой переменной
<i>Высота, м</i>		
Ia	$\frac{-0,0497 \cdot 68,701 + 45,331A^{1,159}}{68,701 + A^{1,159}}$	5...55
I	$\frac{0,0324 \cdot 116,6 + 44,046A^{1,209}}{116,76 + A^{1,209}}$	5...50
II	$\frac{0,0589 \cdot 93,56 + 38,685A^{1,119}}{93,56 + A^{1,119}}$	5...85
III	$\frac{0,0889 \cdot 140,91 + 55,332A^{1,023}}{140,91 + A^{1,023}}$	5...60
IV	$\frac{0,0358 \cdot 99,059 + 38,581A^{1,004}}{99,059 + A^{1,004}}$	5...70
<i>Диаметр, см</i>		
Ia	$\frac{0,1383 \cdot 351,57 + 34,439A^{1,785}}{351,57 + A^{1,785}}$	5...55
I	$\frac{0,2302 \cdot 940,57 + 39,3046A^{1,832}}{940,57 + A^{1,832}}$	5...50
II	$\frac{0,0407 \cdot 644,08 + 28,425A^{1,789}}{644,08 + A^{1,789}}$	5...85
III	$\frac{0,1766 \cdot 1323,19 + 55,332A^{1,889}}{1323,19 + A^{1,889}}$	5...60
IV	$\frac{0,4154 \cdot 3957,93 + 27,575A^{2,132}}{3957,93 + A^{2,132}}$	5...70
<i>Сумма площадей сечений, м²/га</i>		
Ia	$-0,1799 + 0,9805A + 0,01059A^2 - 0,00037A^3$	5...55
I	$0,7056 + 0,3835A + 0,03485A^2 - 0,000623A^3$	5...50
II	$0,0094 + 0,6697A + 0,0065A^2 - 0,000142A^3$	5...85
III	$-0,53598 + 0,78897A + 0,00465A^2 - 4,5455A^3$	5...60
IV	$0,008431 + 0,47134A + 0,00226A^2 - 8,2152A^3$	5...70
<i>Запас, м³/га</i>		
Ia	$-0,3114 + 0,09918A + 0,5165A^2 - 0,00759A^3$	5...55
I	$7,31468 - 3,35837A + 0,5556A^2 - 0,00738A^3$	5...50
II	$2,2047 - 0,12518A + 0,2283A^2 - 0,00246A^3$	5...85
III	$-0,7253 + 1,2666A + 0,10723A^2 - 0,001343A^3$	5...60
IV	$0,5997 + 0,3156A + 0,09959A^2 - 0,00112A^3$	5...70

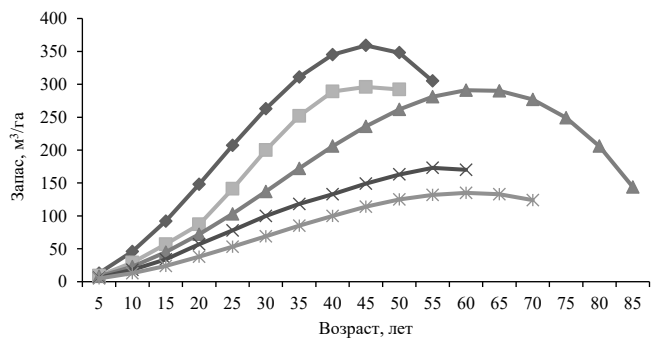
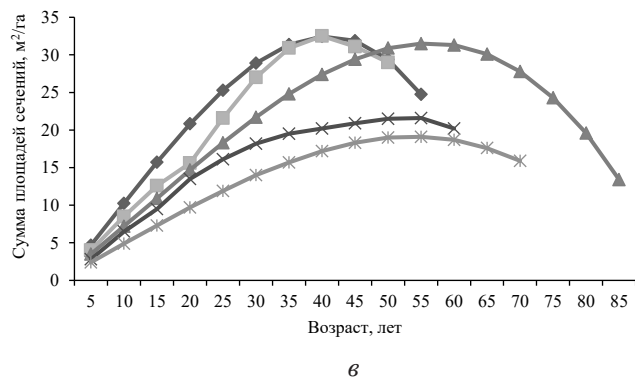
Примечание: A – средний возраст древостоя, лет.

На основе полученных уравнений построены графики зависимости высоты, диаметра, суммы площадей сечений и запаса от возраста по классам бонитета (см. рисунок).



Зависимость высоты (*a*), диаметра (*б*), суммы площадей сечений (*в*) и запаса (*г*) насаждений Ia–IV классов бонитета ольхи серой в таежной зоне Европейского Севера России от возраста древостоя

Fig. 1. Dependence of height (*a*), diameter (*б*), sum of cross-sectional areas (*в*) and stock (*г*) of stands of gray alder Ia–IV class of bonity in the taiga zone of the European North of Russia on stand age



В результате проведенных исследований разработаны таблицы хода роста нормальных древостоев ольхи серой таежной зоны северо-востока европейской части России по классам бонитета (табл. 2).

Таблица 2

Таблицы хода роста древостоев ольхи серой при полноте 1,0
Growth progress tables of gray alder stands at a relative density of 1.0

Возраст, лет	Средние		Число стволов, шт.	Видовое число	Сумма площадей сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га	Прирост, м ³ /га	
	высота, м	диаметр, см					средний	текущий
<i>Ia класс бонитета</i>								
5	3,7	2,0	14907	0,740	4,68	13	2,59	–
10	7,9	5,2	4907	0,564	10,25	46	4,55	6,52
15	11,4	9,1	2424	0,515	15,72	92	6,17	9,39
20	14,5	12,9	1590	0,492	20,82	148	7,41	11,16
25	17,1	16,3	1215	0,479	25,29	207	8,29	11,78
30	19,4	19,1	1009	0,470	28,89	263	8,78	11,25
35	21,4	21,4	871	0,464	31,36	311	8,89	9,57
40	23,1	23,3	762	0,460	32,44	345	8,62	6,74
45	24,7	24,8	660	0,457	31,87	359	7,98	2,79
50	26,0	26,0	552	0,454	29,39	348	6,95	–2,29
55	27,3	27,0	431	0,452	24,76	305	5,55	–8,48
<i>I класс бонитета</i>								
5	2,6	1,2	33611	0,894	4,0	9	1,83	–
10	5,4	3,0	11999	0,637	8,5	29	2,92	4,01
15	8,1	5,4	5459	0,559	12,6	57	3,82	5,63
20	10,7	8,2	2963	0,522	15,6	87	4,35	5,95
25	13,0	11,0	2258	0,502	21,6	141	5,66	10,87
30	15,2	13,8	1793	0,488	27,0	200	6,66	11,66
35	17,1	16,5	1447	0,479	30,9	252	7,21	10,54
40	18,8	18,9	1158	0,472	32,5	289	7,21	7,21
45	20,3	21,1	890	0,467	31,1	296	6,57	1,42
50	21,7	23,1	694	0,464	29,0	292	5,84	–0,74
<i>II класс бонитета</i>								
5	2,5	1,0	44585	0,904	3,5	8	1,58	–
10	4,9	2,3	17608	0,662	7,2	23	2,31	3,03
15	7,0	4,7	6399	0,584	10,9	45	2,98	4,31
20	9,0	7,1	3688	0,544	14,7	72	3,59	5,45
25	10,9	9,5	2605	0,521	18,3	103	4,14	6,30
30	12,5	11,6	2056	0,505	21,7	137	4,58	6,81
35	14,1	13,5	1732	0,495	24,8	172	4,92	6,96
40	15,5	15,2	1517	0,487	27,4	206	5,15	6,72
45	16,7	16,6	1358	0,481	29,4	236	5,25	6,11

Окончание табл. 2

Возраст, лет	Средние		Число стволов, шт.	Видовое число	Сумма площадей сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га	Прирост, м ³ /га	
	высота, м	диаметр, см					средний	текущий
50	17,8	17,9	1229	0,476	30,9	262	5,24	5,12
55	18,9	19,0	1114	0,472	31,5	281	5,10	3,74
60	19,8	19,9	1002	0,469	31,3	291	4,85	1,99
65	20,7	20,8	888	0,466	30,1	290	4,46	-0,14
70	21,4	21,5	766	0,464	27,8	277	3,95	-2,64
75	22,2	22,2	632	0,462	24,3	249	3,32	-5,51
80	22,8	22,7	483	0,461	19,6	206	2,57	-8,74
85	23,4	23,2	316	0,459	13,4	144	1,69	-12,34
<i>III класс бонитета</i>								
5	2,3	0,9	40637	0,951	2,8	6	1,22	-
10	3,9	1,7	28651	0,724	6,5	18	1,84	2,47
15	5,6	3,2	11818	0,628	9,5	34	2,23	3,01
20	7,3	5,4	5907	0,577	13,5	57	2,85	4,68
25	8,9	7,3	3890	0,546	16,1	78	3,14	4,30
30	10,4	9,2	2755	0,526	18,2	100	3,32	4,22
35	11,9	11,0	2038	0,511	19,5	118	3,37	3,71
40	13,2	12,8	1560	0,501	20,2	133	3,34	3,07
45	14,4	14,6	1256	0,492	20,9	149	3,30	3,03
50	15,6	15,9	1083	0,486	21,5	163	3,26	2,87
55	16,7	17,2	930	0,481	21,6	173	3,15	2,03
60	17,7	18,1	785	0,477	20,2	170	2,83	-0,61
<i>IV класс бонитета</i>								
5	2,0	0,8	48336	1,023	2,4	5	1,00	-
10	3,6	1,1	51262	0,753	4,9	13	1,32	1,63
15	5,1	2,4	16154	0,650	7,3	24	1,62	2,22
20	6,5	4,0	7700	0,597	9,7	38	1,89	2,69
25	7,9	5,8	4510	0,564	11,9	53	2,11	3,03
30	9,1	7,5	3160	0,543	14,0	69	2,30	3,21
35	10,2	9,4	2270	0,528	15,7	85	2,43	3,22
40	11,3	11,2	1748	0,517	17,2	100	2,51	3,05
45	12,2	13,0	1380	0,508	18,3	114	2,53	2,71
50	13,1	14,3	1181	0,501	19,0	125	2,50	2,19
55	14,0	15,6	1000	0,495	19,1	132	2,40	1,48
60	14,7	17,0	823	0,491	18,7	135	2,25	0,58
65	15,5	18,0	693	0,487	17,6	133	2,04	-0,50
70	16,1	19,1	555	0,483	15,9	124	1,77	-1,76

Сравнение хода роста ольхи серой в северо-таежном районе северо-востока европейской части России с результатами исследований, полученными для других регионов, позволяет отметить общие тенденции изменения показателей как в естественных условиях произрастания, так и при плантационном выращивании [13, 14].

Таблицы хода роста нормальных древостоев ольхи серой таежной зоны северо-востока европейской части России можно использовать для определения: относительной полноты древостоев по возрасту и классу бонитета; запаса фактического древостоя по классу возраста, бонитету и полноте; возраста естественной спелости насаждения; возраста количественной спелости насаждения; требуемой интенсивности выборочных рубок насаждения; возраста древостоя, когда необходимо проведение рубок ухода.

Заключение

Насаждения ольхи серой занимают все бóльшие площади на территории лесного фонда Архангельской области. Они формируются на постагрогенных землях, в защитных лесах, например на берегозащитных участках, где их роль в сохранении и поддержании стабильности окружающих ландшафтов имеет особое значение. Отсутствие нормативных материалов для оценки древостоев ольхи серой обусловило необходимость использовать таблицы хода роста для осины, что приводило к ошибкам. Выявленные в ходе исследования закономерные связи основных таксационных параметров древостоев с возрастом и полученные математические модели этих связей позволили разработать таблицы хода роста нормальных древостоев ольхи серой по классам бонитета для таежной зоны северо-востока европейской части России. Благодаря предложенным нормативам может быть повышена точность таксации насаждений при выполнении лесоустроительных и мониторинговых работ, установления возраста количественной, технической и естественной спелости, возраста назначения рубок ухода в насаждениях, относительной полноты древостоев по возрасту и классу бонитета, запаса фактического древостоя по классу возраста, бонитету и полноте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бойцов А.К., Мерзук С.А. Формирование сероольшаника на землях, вышедших из-под сельскохозяйственного использования // Тр. СПбНИИЛХ. 2021. № 3. С. 55–66.
Boytsov A.K., Merzuk S.A. Formation of Gray Alder Stands on Lands that Are Not Used for Agricultural Purposes. *Proceedings of the Saint Petersburg Research Institute of Forestry*, 2021, no. 3, pp. 55–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.3.55>
2. Гузова Т.А., Тиходеева М.Ю. Преобразования биогеоценозов суходольных лугов в процессе зарастания ольхой серой (*Alnus incana* (L.) Moench) // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 3: Биология. 2016. № 1. С. 4–20.
Guzova T.A., Tikhodeeva M.Yu. Transformation of Upland Meadow's Biogeocenosis During Processes of Overgrowth by the Gray Alder (*Alnus incana* (L.) Moench). *Bulletin of St. Petersburg University. Ser.: Biology*, 2016, no. 1, pp. 4–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.21638/spbu03.2016.101>

3. Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Гульбе А.Я., Ермолова Л.С. Биологическая продуктивность гидрофильных сероольшаников Ярославской области // Лесоведение. 2020. № 1. С. 64–75.

Gulbe Ya.I., Gulbe T.A., Gulbe A.Ya., Ermolova L.S. Biological Productivity of Hydrophilic Gray Alder Forests of the Yaroslavl Region. *Forestry*, 2020, no. 1, pp. 64–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114820010064>

4. Лабоха К.В. Особенности естественного возобновления в сероольшаниках Беларуси // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теор. и практ. 2015. Т. 3, № 4-2. С. 71–74.

Labokha K.V. Features of Natural Regeneration in Gray Alder Forests of Belarus. *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2015, vol. 3, no. 4-2, pp. 71–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/14088>

5. Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В. Таблицы хода роста нормальных ивовых древостоев таежной зоны северо-востока европейской части России // Тр. СПбНИИЛХ. 2021. № 2. С. 17–27.

Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V. Growth Dynamics Tables of Normal Willow Stands in the Taiga Zone of the European Northeast Part of Russia. *Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*, 2021, no. 2, pp. 17–27. (In Russ.).

6. Семенещенков Ю.А. Фитоценоотическое разнообразие сероольховых лесов на юго-западе Нечерноземья России // Растительность России. 2014. № 25. С. 71–88.

Semenishchenkov Yu.A. Phytocoenotic Diversity of the Gray Alder Forests of the Southern-West of Nechernozemye of Russia. *Vegetation of Russia*, 2014, no. 25, pp. 71–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.31111/vegus/2014.25.71>.

7. Тимофеева А.В. Распространение ольхи серой на территории Архангельской области // Состояние лесов и актуальные проблемы лесоуправления: материалы Всерос. конф. с междунар. участием, Хабаровск, 10–11 окт. 2013 г. Хабаровск, 2013. С. 79–82.

Timofeeva A.V. Distribution of Gray Alder in the Arkhangelsk region. *State of Forests and Current Problems of Forest Management: materials of the All-Russian Conference with International Participation*. Khabarovsk, 2013, pp. 79–82. (In Russ.).

8. Третьяков С.В., Коптев С.В., Богданов А.П., Ильинцев А.С., Демиденко С.А., Тимофеева А.В. Лесотаксационные нормативы для определения объема стволов ольхи серой *Alnus incana* L. по разрядам высот // Сиб. лесн. журн. 2017. № 3. С. 81–86.

Tretyakov S.V., Koptev S.V., Bogdanov A.P., Ilintsev A.S., Demidenko S.A., Timofeeva A.V. Forest Inventory Standards for Determining the Volume of the Trunks of Gray Alder *Alnus incana* L. according to the Categories of Heights. *Siberian Forest Journal*, 2017, no. 3, pp. 81–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170308>

9. Юркевич И.Д., Гельтман В.С., Парфенов В.И. Сероольховые леса и их хозяйственное использование. Минск: АН БССР, 1963. 142 с.

Yurkevich I.D., Geltman V.S., Parfenov V.I. *Gray Alder Forests and their Economic Use*. Minsk, The National Academy of Sciences of Belarus Publ., 1963. 142 p. (In Russ.).

10. Юркевич И.Д., Парфенов В.И. Ход роста сероольшаников Белоруссии по типам леса // Изв. вузов. Лесн. журн. 1961. № 1. С. 5–10.

Yurkevich I.D., Parfenov V.I. Growth Dynamic of Gray Alder Forests in Belarus by Forest Type. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1961, no. 1, pp. 5–10. (In Russ.).

11. Aosaar J., Varik M., Lõhmus K., Ostonen I., Becker H., Uri V. Long-term Study of Above- and Below-Ground Biomass Production in Relation to Nitrogen and Carbon Accumulation Dynamics in a Grey Alder (*Alnus incana* (L.) Moench) Plantation on Former Agricultural Land. *European Journal of Forest Research*, 2013, vol. 132, no. 5, pp. 737–749. <https://dx.doi.org/10.1007/s10342-013-0706-1>

12. Aossar J., Varik M., Uri V. Biomass Production Potential of Grey Alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) in Scandinavia and Eastern Europe: A review. *Biomass & Bioenergy*, 2012, vol. 45, pp. 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.013>
13. Arhipova N., Gaitnieks T., Donis J., Stenlid J., Vasaitis R. Decay, Yield Loss and Associated Fungi in Stands of Grey Alder (*Alnus incana*) in Latvia. *Forestry*, 2011, vol. 84, iss. 4, pp. 337–348. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr018>
14. Daugaviete M., Lazdina D., Bambi B., Lazdins A., Makovskis K., Daugavietis U. Plantation Forests: A Guarantee of Sustainable Management of Abandoned and Marginal Farmlands. *Energy Efficiency and Sustainable Lighting*, 2020. 274 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88373>
15. Houston Durrant T., de Rigo D., Caudullo G. *Alnus incana* in Europe: Distribution, Habitat, Usage and Threats. *European Atlas of Forest Tree Species*. Luxembourg, Publ. Off., 2016, pp. 66–67.
16. Hytönen J., Saarsalmi A. Long-term Biomass Production and Nutrient Uptake of Birch, Alder and Willow Plantations on Cut-Away Peatland. *Biomass & Bioenergy*, 2009, vol. 33, iss. 9, pp. 1197–1211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.014>
17. Kärki T., Maltamo M., Eerikäinen K. Diameter Distribution, Stem Volume and Stem Quality Model for Grey Alder (*Alnus incana*) in Eastern Finland. *New Forests*, 2000, vol. 20, pp. 65–86. <https://doi.org/10.1023/A:1006793616781>
18. Rytter L., Rytter R.M. Growth and Carbon Capture of Grey Alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) under North European Conditions – Estimates Based on Reported Research. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 373, pp. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.034>
19. Shaw K., Wilson B., Roy S. *The Red List of Betulaceae*, 2014. 68 p.
20. Vacek Z., Vacek S., Podrazsky V., Kral J., Bulusek D., Putalova T., Balas M., Kalouskova I., Schwarz O. Structural Diversity and Production of Alder Stands on Former Agricultural Land at High Altitudes. *Dendrobiology*, 2016, vol. 75, pp. 31–44. <https://doi.org/10.12657/denbio.075.004>
21. Zandersons J., Dobele G., Jurkane V., Tardenaka A., Spince B., Rizhikovs J., Zhurinsk A. Pyrolysis and Smoke Formation of Grey Alder Wood depending on the Storage Time and the Content Of Extractives. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, vol. 85, iss. 1–2, pp. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.036>

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*907.32(470.22)

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-81-101

Система мониторинга природной динамики лесного массива заповедника «Костомукшский»

Б.В. Раевский[✉], *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID: K-6424-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-8937>

А.А. Ильинов, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID: L-5854-2013*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3416-0312>

М.В. Медведева, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID: AAL-4191-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2543-3123>


О.В. Рудковская, *канд. биол. наук*; *ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0050-7584>*

Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; borisraevsky@gmail.com[✉], ialex33@yandex.ru, mariamed@mail.ru, rudkov.o@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.06.21 / Одобрена после рецензирования 23.09.21 / Принята к печати 25.09.21

Аннотация. Проведено исследование в заповеднике «Костомукшский» с целью разработки концепции развития сети лесного мониторинга в данном заповеднике. Показано, что в лесном покрове заповедника преобладают сосняки (80,4 % от покрытой лесом площади), далее по доле участия следуют ель (19,1 %) и береза (0,5 %). Экологический спектр лесов заповедника включает 7 групп типов леса с преобладанием черничной группы (67 %) как среди сосняков, так и среди ельников. Хвойные древостои заповедника представлены условно-однообразными, относительно- и абсолютно- разновозрастными типами возрастных структур, характеризующими различные этапы посткатастрофического восстановительного сукцессионного цикла и фазы циклической динамики субклимаксовых и климаксовых сообществ. Выявлено, что антропогенно измененные леса располагаются преимущественно в западном, граничащем с Финляндией секторе заповедника. В восточном секторе сконцентрированы малонарушенные массивы северотаежных лесов с хорошо выраженной мозаичной картиной фаз естественной возрастной динамики. Предложено развивать систему лесного мониторинга на базе ландшафтно-типологического и пространственно-временного подходов с учетом субландшафтной структуры природно-территориального комплекса заповедника. Планируется закладывать постоянные пробные площади в границах 3 модельных территорий (участков), а также в разрезе 5 типов леса для сосны и 2 – для ели. Сосновые и еловые сообщества должны быть представлены всеми возрастными группами условно-однообразных древостоев (максимум 4 пробные площади), а также не менее чем 1 пробной площадью в каждом типе (подтипе) разновозрастной структуры. Согласно предварительным оценкам, общая численность постоянных пробных площадей в составе сети лесного мониторинга заповедника «Костомукшский» должна быть не менее 98 шт. Такое значительное число опытных объектов необходимо для разработки алгоритма корректировки существующих повидельных характеристик в аспекте уточнения типа возрастной структуры древостоя и фазы возобновительной динамики.

© Раевский Б.В., Ильинов А.А., Медведева М.В., Рудковская О.В., 2023

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

Ключевые слова: лесной мониторинг, постоянная пробная площадь, сукцессия, возрастная структура, естественная динамика, малонарушенные леса, сосняк, ельник, заповедник «Костомукшский», Республика Карелия

Благодарности: Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение госзадания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН) и при финансовой поддержке заповедника «Костомукшский» (хоздоговоры № 1/016, 2/017, 3/017, 1/018, 2/018). Авторы благодарны коллективу заповедника «Костомукшский» и его директору С.В. Тархову за помощь в организации полевых работ.

Для цитирования: Раевский Б.В., Ильинов А.А., Медведева М.В., Рудковская О.В. Система мониторинга природной динамики лесного массива заповедника «Костомукшский» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 81–101. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-81-101>

Original article

The Natural Dynamics Monitoring System of the Forests in the Kostomukshsky Reserve

Boris V. Raevsky[✉], Doctor of Agriculture; ResearcherID: [K-6424-2018](https://orcid.org/0000-0002-1315-8937),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-8937>

Aleksey A. Ilinov, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [L-5854-2013](https://orcid.org/0000-0003-3416-0312),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3416-0312>

Maria V. Medvedeva, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAL-4191-2020](https://orcid.org/0000-0002-2543-3123),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2543-3123>

Oksana V. Rudkovskaya, Candidate of Biology; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0050-7584>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; borisraevsky@gmail.com[✉], ialexa33@yandex.ru, mariaimed@mail.ru, rudkov.o@yandex.ru

Received on June 28, 2021 / Approved after reviewing on September 23, 2021 / Accepted on September 25, 2021

Abstract. The concept and current results of setting up the forest monitoring network at the Kostomukshska Strict Nature Reserve (Zapovednik) are presented. It has been demonstrated that pine forests predominate in the reserve's forest cover (80.4 % of the forested area), followed by spruce (19.1 %) and birch (0.5 %). The ecological spectrum of the reserve's forests comprises 7 groups of forest types, with the bilberry group prevailing (67 %) both among pine and among spruce stands. In terms of age structure, coniferous stands in the reserve are even-aged, multi-aged and all-aged, representing stages of the post-catastrophic regeneration succession and phases of subclimax and climax community cycles. Analysis of spatial patterns in the distribution of pristine and secondary forests has shown that anthropogenically altered forests are mainly situated in the western part of the reserve, at the border with Finland. The eastern part is a concentration of pristine north-taiga forests with a distinct mosaic of natural age dynamics phases. It was suggested that the forest monitoring network should be based on the landscape typological and spatial-temporal approaches taking into account the sublandscape-level structure of the reserve's natural territorial complex and the distribution of forests in the study area by the rate of anthropogenic influence, prevalent species, forest types, and age structure types. Permanent sample plots will be established within 3 model



areas (sites). For each of the 5 forest types of pine and 2 types of spruce stands, such plots should represent all age groups of even-aged stands (4 sample plots at maximum), and at least one sample plot should be allocated for each type (subtype) of the uneven-aged structure. The preliminary estimate is that, in total, there should be at least 98 permanent sample plots in the forest monitoring network of the Kostomukshskiy Zapovednik. So many units are needed to work out the algorithm for correcting the existing forest compartment characteristics given by the forest inventory in what concerns the age structure and the succession phase of stands. It is foreseen that all the factual material thus amassed will serve as the basis for modeling the scenarios of the natural dynamics of this forest massif and, perhaps, of other objects with similar structure.

Keywords: forest monitoring, permanent sample plot, succession, age structure, natural dynamics, pristine forests, pine forest, spruce forest, Kostomukshsky Reserve, Republic of Karelia

Acknowledgements: Financial support for the research was carried out from the federal budget to fulfill the state task of the KarRC RAS (Forest Institute of the KarRC RAS) and with the financial support of the Kostomukshska Strict Nature Reserve (economic agreements No. 1, 016; 2/017. 3, 017. 1, 018. 2, 018). The authors are grateful to the staff of the Kostomukshsky Strict Nature Reserve and its director S.V. Tarkhov for assistance in organizing field work.

For citation: Raevsky B.V., Ilinov A.A., Medvedeva M.V., Rudkovskaya O.V. The Natural Dynamics Monitoring System of the Forests in the Kostomukshsky Reserve. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 81–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-81-101>

Введение

Малонарушенный таежный массив – это неповторимая мозаика «пятен» (биогеоценозов), находящихся на различных этапах сукцессионной динамики после того или иного катастрофического воздействия [17, 18]. Концептуально модель динамики лесного массива в границах заповедника рассматривает его территорию как состоящую из набора площадей (участков, лесохозяйственных выделов), каждая из которых занята лесом в определенном состоянии [7]. Элементы такой мозаики принимаются как структурно и экологически однородные. Они способны переходить из одного состояния в другое по причине внутренней эволюции (сукцессии) и внешних естественных воздействий. Для построения адекватной модели лесного массива необходимо знание структурных характеристик каждого выдела (участка) с присвоением ему сукцессионного статуса (категории) и оценкой вероятности возможных внешних воздействий. При моделировании динамики заповедного лесного массива все внешние воздействия принимаются в качестве имеющих естественную природу.

В аспекте исследований спонтанной динамики малонарушенных лесов наибольшие успехи в последние десятилетия были достигнуты при изучении природной динамики еловых массивов европейской части РФ [4, 9, 14, 16, 17]. В таежной зоне Европейского Севера России малонарушенные лесные территории с преобладанием сосны обыкновенной крайне редки, поэтому их природная динамика до сих пор исследована недостаточно.

В конце XX – начале XXI вв. в границах Костомукшского городского округа выделены 2 крупные особо охраняемые природные территории (ООПТ)

федерального значения – государственный природный заповедник (ГПЗ) «Костомукшский» (1983 г.) и национальный парк «Калевальский» (2006 г.). С марта 2015 г. данные ООПТ (всего 123,63 тыс. га) функционируют как единое природоохранное учреждение, сохранившее наименование ГПЗ «Костомукшский». В настоящее время эти 2 заповедных кластера разделены полосой эксплуатационных лесов шириной 36 км (рис. 1). Указанные ООПТ весьма близки с ландшафтной точки зрения и в хозяйственно-историческом отношении. Целью настоящего исследования являлась разработка концепции и программы создания сети лесного мониторинга в границах именно заповедника «Костомукшский», а также анализ первых результатов в этом направлении.

Объекты и методы исследования

ГПЗ «Костомукшский», общей площадью 49 276 га, расположен в центральной части Западно-Карельской возвышенности ($64^{\circ}19'–64^{\circ}35'$ с. ш. $30^{\circ}38'–30^{\circ}03'$ в. д.). Как следует из рис. 1, территория является заповедной частью компактного малонарушенного соснового массива, занимающего около 105 000 га. В качестве методической основы для анализа возрастной структуры сосняков использовалась классификация С.С. Зябченко [5], модифицированная с учетом особенностей представления информации в выделительных базах данных. Древостой считается абсолютно-разновозрастным при соблюдении ряда условий: в нем произрастает не менее 2 поколений сосны; ни одно из них не превышает по составу 4 ед.; возраст старшего поколения равен или больше 170 лет. При доле одного из поколений 5 ед. и более древостой классифицируется как относительно-разновозрастный. В случае выделения только одного возрастного поколения сосны – относится к условно-одновозрастным. Аналогичный методический подход реализован по отношению к ельникам [4].

Всего за период 2016–2019 гг. с соблюдением основных требований ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные» и с учетом особенностей структуры заповедника на субландшафтном уровне было заложено 24 постоянные пробные площади (ППП). На каждой ППП производилась нумерация деревьев с диаметром более 6,1 см на высоте груди (1,3 м). Осуществлялся пересчет насаждения по породам, ступеням толщины, а сосны и ели – по возрастным поколениям. Возраст деревьев определялся глазомерно после предварительной тренировки. Для этого у шейки корня 25–27 деревьев преобладающей породы брались керны с целью точного определения числа годовых колец. У сопутствующих пород керны отбирались у 3–4 деревьев из наиболее представленной и у 1–2 деревьев из других ступеней толщины. В дальнейшем у деревьев измерялась высота ствола с помощью высотомера Haglof. Сухостой учитывался отдельно. Таксация древостоев велась с описанием деревьев по состоянию (здоровые, поврежденные, усыхающие) и отметкой расположения их в пологе (открытая и закрытая вершина). Учет естественного возобновления производился на трех 5-метровых лентах, прокладываемых параллельно короткой стороне ППП примерно на равном расстоянии друг от друга. Подрост изучался с подразделением его по группам высот (до 0,25; 0,26–0,50; 0,51–1,00; 1,01–1,50; 1,51–2,00; свыше 2,00 м), а также по состоянию: жизнеспособный, нежизнеспособный, погибший.

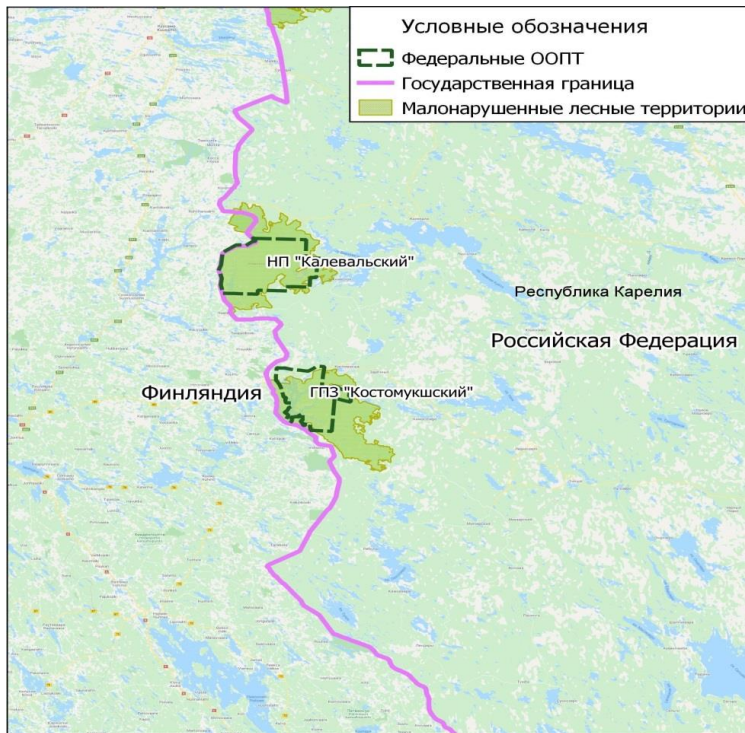


Рис. 1. Географическое положение ГПЗ «Костомукшский»

Fig. 1. Location of the Kostomukshsky Reserve

Геоботанические описания напочвенного покрова выполнялись по общепринятой методике [12]. Закладывались линейные серии, или трансекты, учетных площадок 10×10 м. Взаимное расположение и количество учетных площадок варьировало от 4 до 20 в зависимости от общей размерности ППП, сложности мезорельефа и гетерогенности напочвенного покрова. На каждой ППП закладывался почвенный разрез. Для более детального исследования почвенного покрова делались прикопки. Производились отбор образцов для почвенного анализа и описание почв [6]. Обработка материала велась используемыми в лесной таксации и лесоводственных исследованиях методами [8, 15].

Результаты исследования и их обсуждение

Подробные результаты анализа повидельной базы данных заповедника «Костомукшский» были опубликованы ранее [13]. Показано, что по составу пород лесные сообщества заповедника являются типичными для северотаежной подзоны Восточной Фенноскандии. Число лесобразующих пород ограничено – это виды родов сосна (*Pinus sylvestris* L.), ель (*Picea × fennica* (Regel) Kom.) и береза (*Betula* sp.). В покрытой лесом площади преобладают сосняки (80,4 %), далее по доле представленности следуют ельники (19,1 %) и березняки (0,5 %). Экологический спектр лесов заповедника обычен для северотаежной подзоны и укладывается в рамки 7 групп типов леса. Наблюдается преоблада-

ние черничной группы типов леса, причем у сосны (66,8 %) и ели (66,6 %) доли этих формаций различаются незначительно. Было установлено 11 типов леса для сосны, 9 – для ели и 7 – для березы. Возраст насаждений сосны колеблется в пределах I–XIV, а для ели – II–XII классов возраста (класс возраста – 20 лет), демонстрируя характер распределения, свойственный для малонарушенных таежных лесов. Структура лесного фонда заповедника по категориям земель и распределение древостоев сосновой и еловой формаций по классам возраста свидетельствуют, что изучаемые леса избежали промышленного освоения, хотя и испытали в прошлом определенное антропогенное воздействие. Анализ этой информации в отношении лесов заповедника позволяет сформулировать набор базовых положений, закладываемых в основу проектируемой системы ППП:

- сосняки и ельники являются основными объектами для закладки ППП;
- в сосняках ППП закладываются в 5 типах леса – вересковом, брусничном, черничном, долгомошном и багульниковом;
- в ельниках – в 2 типах – черничном и долгомошном;
- в системе должен быть представлен весь возрастной спектр хвойных биогеоценозов с таксационным возрастом для сосны в диапазоне 30–320 лет и для ели – 40–240 лет.

Важным фактором в проектировании пространственной структуры системы мониторинга является хорошая изученность территории заповедника в ландшафтно-экологическом аспекте. Для заповедника характерно доминирование денудационно-тектонического холмисто-грядового с комплексами ледниковых и водно-ледниковых образований среднезаболоченного ландшафта с преобладанием сосновых местообитаний. Как было отмечено А.Н. Громцевым, «Леса представленного здесь естественного соснового массива, в разрезе отдельных насаждений (биогеоценозов), в отдельно взятый момент времени, всегда находятся на различных стадиях преимущественно пирогенных сукцессионных рядов» [3, с. 77]. При проектировании системы мониторинга необходимо учитывать внутриландшафтную дифференциацию на крупные морфологические части – местности, поскольку «...в отличие от ландшафта с “преимущественно” одними типами генетических форм рельефа и рыхлых отложений местность характеризуется ярко выраженным единством генезиса форм рельефа и однородным составом четвертичного покрова» [2, с. 67]. С учетом сказанного представляется целесообразной организация системы лесного мониторинга на базе модельных территорий, отражающих все разнообразие местностей заповедника и степень антропогенной нарушенности лесных биогеоценозов (рис. 2). На рис. 2 показано расположение модельных участков, номера которых совпадают с номерами типов местностей, выделенных при составлении ландшафтной карты заповедника [2, 3]. По данным последнего лесоустройства, хвойные древостои с возрастом основного поколения моложе 141 года занимают 38,1 % от покрытой лесом площади заповедника. Пространственная компоновка их основной части в районе оз. Каменного позволяет довольно точно очертить границы существенного антропогенного воздействия в прошлом. Антропогенно измененные леса располагаются преимущественно в западном, граничащем с Финляндией секторе заповедника, который с середины 60-х гг. XX в. отсекается линией пограничных инженерно-технических сооружений.

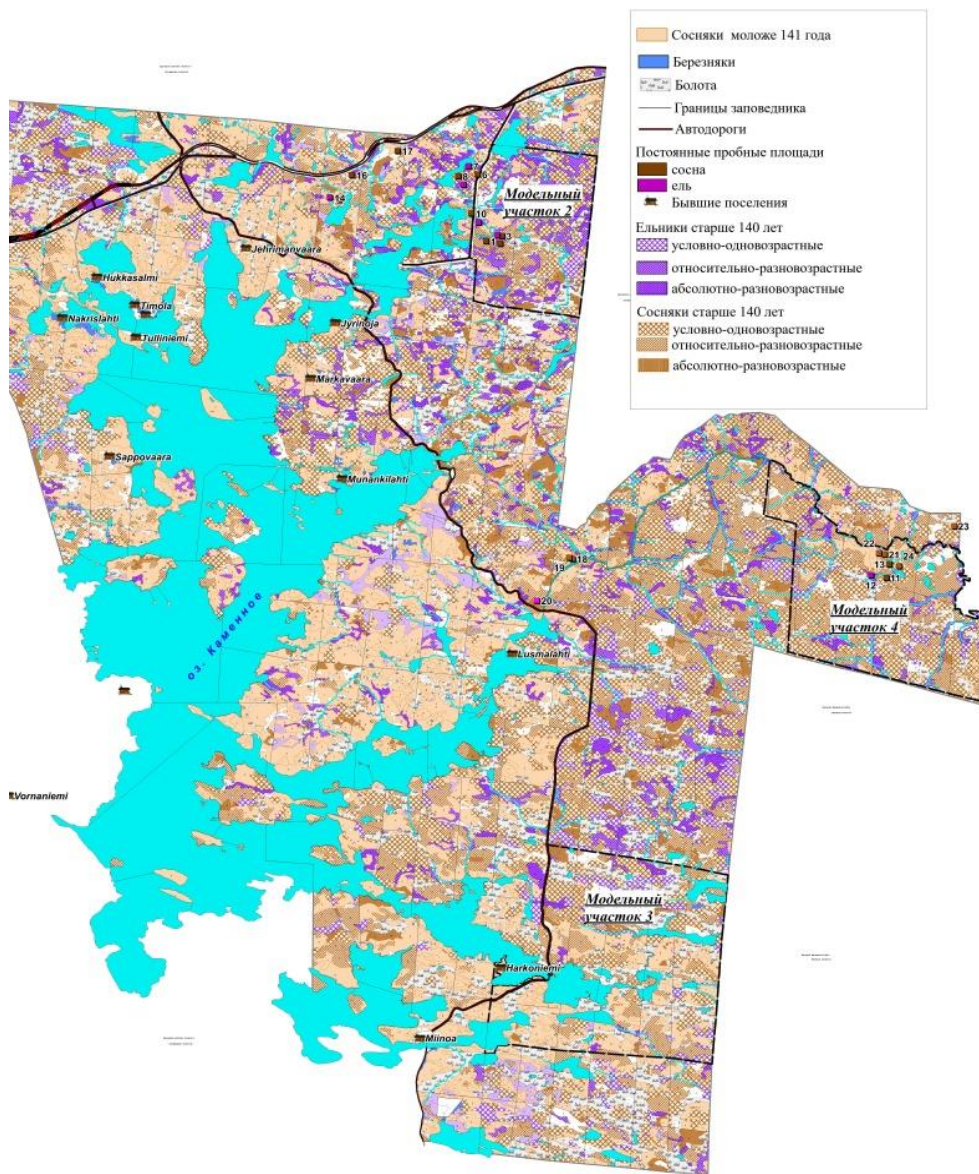


Рис. 2. Дислокация модельных участков на территории ГПЗ «Костомукшский»

Fig. 2. Layout of model areas and sample plots location in the Kostomukshsky Reserve

На рис. 2 линия инженерно-технических сооружений совпадает с линией автодороги, пересекающей заповедник с северо-запада на юго-восток. Дислокация модельного участка 1, который должен представлять массив типичных для заповедника лесов, испытавших антропогенное воздействие, окончательно не определена. По всей видимости, он будет располагаться

у северной границы заповедника в районе ППП 14, 16 и 17. В восточном секторе заповедника сконцентрированы наименее нарушенные массивы северотаежных лесов с хорошо выраженной пространственной мозаикой фаз естественной возрастной динамики. Здесь выделены модельные участки 2, 3 и 4. В пределах каждого из них подбор объектов и планирование размещения ППП должны осуществляться таким образом, чтобы максимально представить намеченный выше типологический спектр сосновых и еловых биогеоценозов (выделов) во временном (возрастном) диапазоне этапов сукцессионного цикла.

Наблюдаемый нами в заповеднике тип сукцессионного цикла относится к вторичной сукцессии [11, 19, 20]. Особенностью сукцессионных процессов в северотаежных сосновых лесных массивах является то, что вне антропогенного влияния (земли, вышедшие из-под сельскохозяйственного пользования, и т. п.) стадия начального леса протекает практически без участия пионерных лиственных пород. Отсутствие осинников и малая доля березняков в заповеднике подтверждают этот факт. В бедных экстремально сухих и влажных местообитаниях сосна обыкновенная берет на себя роль как пионерной, так и климаксовой породы. В более благоприятных почвенно-гидрологических условиях породой заключительной стадии формирования леса становится ель.

Особенности возобновительного процесса и продолжительность отдельных этапов сукцессионного цикла сосняков Карелии играют существенную роль при организации мониторинга. Считается [5], что условно-однообразные сосняки формируются при быстром заселении (в течение 20–40 лет) открытых гарей (горельников с уничтоженным древостоем) и сплошных ветровалов. В этих древостоях 80–90 % запаса и числа деревьев пересчетных размеров приходится на 2 смежных класса возраста. При таксации выделяется 1 поколение. Это 1-й крупный этап сукцессионного цикла восстановления коренного таежного сообщества после некоего катастрофического нарушения. Относительно-разновозрастные хвойные древостои начинают формироваться за пределами 200-летнего рубежа в условиях так называемого режима оконной динамики. Он подразумевает отсутствие в течение 200–280 лет каких-либо тотальных катастрофических нарушений и фрагментарное, оконное разреживание полога 1-го поколения под воздействием таких экзогенных факторов, как ветровалы, снеговалы и низовые пожары. По мнению С.С. Зябченко [5], время вхождения сосны 2-й генерации в верхний полог (280–300 лет с начала заселения территории сосной) следует считать началом 2-го периода, который продолжается до момента начала распада поколения сосны 2-й генерации (480–500 лет). Это 2-й крупный этап сукцессионного цикла, при прохождении которого насаждению свойственна относительная разновозрастность. По мере распада сосны 2-й генерации создается благоприятная экологическая обстановка для роста сосны 3-й генерации (примерно 600 лет после заселения сосной территории). По завершении 2-го этапа сукцессии появляются условия для достижения абсолютной разновозрастности (разно-

возрастные насаждения с выраженными поколениями). Это 3-й, финальный, этап сукцессионного цикла, заканчивающийся формированием климаксового биогеоценоза.

Таким образом, этап существования условно-однообразных древостоев охватывает стадии начального и промежуточного леса и представляет собой однонаправленный поступательный процесс. Время вхождения 2-й генерации в верхний полог знаменует переход к стадии заключительного леса. Именно в этот период в сравнительно благоприятных почвенно-экологических условиях возможна смена сосны елью и формирование субклимаксового и климаксового сообществ с господством последней. Естественная динамика древостоев на заключительной стадии, как правило, циклична: наблюдаются осциллирующие дигрессивно-демутационные смены, принадлежащие к соответствующему варианту и фазе (подфазе) возобновительной динамики [1, 4, 16]. В развитии сосняков цикличность определяется преимущественно волновым характером естественного возобновления после умеренных низовых пожаров, способствующих минерализации почвы и появлению особей новой генерации. Сильные устойчивые пожары существенно нарушают эндогенный ход развития сосновых экосистем или практически полностью уничтожают древостой [5].

Как следует из табл. 1, для исследуемого массива средняя общая продолжительность стадий начального и промежуточного леса составила примерно 200 лет при фактическом максимальном возрасте условно-однообразных сосняков 260, а ельников – 210 лет. Стадии начального и промежуточного леса, характеризующиеся условной однообразностью древостоя, были разбиты на 4 возрастных периода продолжительностью около 60 лет каждый. Величина периода, равная 3 классам возраста, была принята, во-первых, в связи с замедленным развитием хвойных древостоев в северотаежных условиях: до 60-летнего возраста они выглядят как молодняки; во-вторых, с желанием разбить направленную во времени стадию начального и промежуточного леса на примерно равные хронологические отрезки. В разрезе избранного набора типов леса закладка ППП планируется во всех группах возраста условно-однообразных насаждений (табл. 1), а также во всех вариантах типов возрастной структуры, включая выделенные подтипы разновозрастных древостоев (табл. 2). Таким образом, в границах модельного участка максимальное число ППП в одном типе леса может достигать 7 шт. Однако, как будет показано ниже, конкретное число ППП определяется возрастным диапазоном условно-однообразных насаждений и представленностью остальных типов возрастной структуры на модельном участке.

В пределах выбранных типов леса ППП закладываются с учетом производительности древостоев, а именно – в насаждениях, характеризующихся самым распространенным в типе леса классом бонитета. Для черничного и брусничного типов – это IV, для верескового, долгомошного и багульникового – V.

Таблица 1

Распределение условно-одновозрастных сосняков и ельников в заповеднике
«Костомукшский» по группам возраста
Distribution of even-aged pine and spruce forests in the Kostomukshsky Reserve
by age groups

Тип леса	Группа возраста, лет							
	0–60		61–120		121–180		181–260	
	Воз- раст, лет	Пло- щадь, га	Воз- раст, лет	Пло- щадь, га	Воз- раст, лет	Пло- щадь, га	Воз- раст, лет	Пло- щадь, га
<i>Сосняки</i>								
Скальный	–	–	110	1,2	159	11,8	195	1,0
Беломошный	25	6,5	110	1,7	160	21,3	210	3,4
Вересковый	47	49,5	74	20,5	149	86,1	210	9,9
Брусничный	37	39,3	99	279,2	152	682,5	210	103,9
Черничный	42	48,6	101	1535,6	151	6158,8	200	725,0
Травяно-злаковый	–	–	100	17,3	151	93,3	198	21,9
Таволговый	38	2,0	110	2,6	130	2,2	–	–
Осоко-сфагновый	49	8,2	77	9,0	160	64,7	195	7,6
Долгомошный	41	12,0	97	88,0	152	269,1	201	61,5
Багульниковый	46	44,4	94	68,1	156	285,8	201	106,8
Сфагновый	53	7,8	93	26,9	160	87,7	202	8,5
<i>Среднее/Итого</i>	42	218,3	96	2050,1	152	7763,3	203	1049,5
<i>Ельники</i>								
Брусничный	–	–	–	–	180	0,8	–	–
Черничный	40	2,5	107	280,0	150	841,3	197	17,3
Травяно-злаковый	–	–	–	–	135	4,1	–	–
Приручейный	–	–	–	–	155	11,2	190	5,4
Осоко-сфагновый	–	–	88	3,9	158	43,4	190	1,7
Долгомошный	35	1	109	70,8	158	600,9	195	58,4
Багульниковый	–	–	–	–	180	1,7	195	6,4
Сфагновый	–	–	–	–	140	2,8	–	–
<i>Среднее/Итого</i>	38	3,5	101	354,7	157	1506,2	193	89,2

Примечание: Полужирным шрифтом выделены типы леса, в которых планируется закладка ППП.

Таблица 2

**Распределение сосняков и ельников старше 140 лет в заповеднике
«Костомукшский» по типам возрастных структур
Distribution of pine and spruce forests over 140 years old in the Kostomukshsky
Reserve by age structure types**

Тип возрастной структуры (фаза динамики)	Класс бонитета	Класс возраста	Относительная полнота	Состав и структура	Запас, м ³ /га	Площадь		
						га	%	
<i>Сосняки</i>								
Условно-одно-возрастные	IV,1	VIII,3	0,66	7,6C ₁₆₀ 2E ₁₂₀ 0,4Б ₉₀	197	8084,4	46,5	
Относительно-разновозрастные, в т. ч.:	IV,4	VIII,9	0,62	4,7C ₂₀₀ 4C ₁₃₀ 1,3E ₁₄₀ +Б	179	7591,7	43,6 (100)	
	подтип 1	IV,4	X	0,59	6,2C ₁₉₀ 2,6C ₁₂₀ 1,2E ₁₄₀ +Б ₉₀	161	4012,4	52,9
	подтип 2	IV,3	VII,4	0,68	6,3C ₁₄₀ 2,3C ₂₁₀ 1E ₁₃₀ 0,4Б ₁₀₀	198	3579,3	47,1
Абсолютно-разновозрастные	IV,1	VIII,9	0,63	3,1C ₂₀₀ 2,9C ₁₃₀ 2,4E ₁₅₀ 1,6E ₁₂₀ /Б ₁₀₀ +Ос ₁₀₀	190	1715,8	9,9	
<i>Ельники</i>								
Условно-одно-возрастные	IV,6	VIII,3	0,6	6,6E ₁₆₀ 2,3C ₁₆₀ 1,1Б ₉₀	177	1528,8	31,3	
Относительно-разновозрастные, в т. ч.:	IV,0	VIII,4	0,7	5,1E ₁₇₀ 2,4E ₁₁₀ 1,4C ₁₆₀ 1,1Б ₁₀₀	212	1570,5	32,1 (100)	
	подтип 1	IV,1	VIII,7	0,7	5,5E ₁₇₀ 2E ₁₁₀ 1,4C ₁₆₀ +1,1Б ₁₀₀	213	1467,6	93,4
	подтип 2	IV,7	VII,1	0,7	5,5E ₁₃₀ 1,7E ₁₉₀ 1,4C ₁₅₀ 1,2Б ₁₀₀ 0,2Ос ₁₁₀	194	102,9	6,6
Абсолютно-разновозрастные	IV,1	VIII,5	0,7	3,5E ₁₇₀ 2,3E ₁₁₀ 2,1C ₁₆₀ 1,1Б ₁₀₀ 1Ос ₁₀₀	206	1791,4	36,6	

Модельный участок 2. Территория – крупные денудационно-тектонические возвышенности с преобладанием сосновых местообитаний. Доля ельников в структуре покрытой лесом площади сравнительно высока (36,5 %), преобладает черничный тип леса, составляя соответственно 75,4 и 81,7 % от площади сосновых и еловых биогеоценозов. Распределение по типам возрастных структур сосняков и ельников участка в разрезе выбранных для мониторинга типов леса приведено в табл. 3.

Кроме описанных вариантов возрастной структуры насаждений, для условно-одновозрастного типа было выделено 2 подтипа, а именно подтип УО-1 с коэффициентом участия главной породы меньше 8 и УО-2, для которого данный параметр равен и больше 8. При прочих одинаковых условиях ППП закладываются в подтипе УО-2.

Таблица 3

**Распределение сосняков и ельников в границах модельного участка 2
по типам возрастных структур**
**Distribution of pine and spruce stands within the boundaries of model plot 2
by age structure type**

Тип возрастной структуры	Состав и структура	Средние		Запас, м ³ /га	Диапазон возраста, лет	Пло- щадь, %	Коли- чество ППП, шт.
		высота, м	диаметр, см				
<i>Сосняк брусничный</i>							
УО-2	8C ₁₉₀ 1E ₁₅₀ 1Б ₁₁₀	18,0	26	193	15...190	14,5	3
ОТНР-1	6C ₂₁₀ 2C ₁₂₀ 1E ₁₂₀	19,0	30	161	190...230	79,4	1
ОТНР-2	5C ₁₂₀ 3C ₂₁₀ 1E ₁₂₀	16,0	18	144	120...150	6,1	1
АР	–	–	–	–	–	–	–
<i>Сосняк черничный</i>							
УО-1	6C ₁₇₀ 2E ₁₄₀ 2Б ₁₂₀ Ос _{ед.}	20,9	30	200	130...210	52,2	–
УО-2	8C ₁₄₀ 1E ₁₁₀ 1Б ₁₁₀	21,4	26	247	130...210	11,4	2
ОТНР-1	5C ₁₉₀ 2C ₁₃₀ 1E ₁₆₀ 1Б ₁₂₀	20,0	31	208	150...210	6,6	1
ОТНР-2	6C ₁₅₀ 1C ₂₁₀ 2E ₁₂₀ 1Б ₁₁₀	20,0	25	217	110...150	17,8	1
АР	4C ₁₅₀ 2C ₂₁₀ 2E ₁₇₀ 2Б ₁₁₀	20,5	28	220	100...250	12,0	1
<i>Сосняк багульниковый</i>							
УО-1	7C ₂₁₀ 3E ₁₇₀	13,0	22	57	210	4,6	1
ОТНР-1	6C ₂₁₀ 2C ₁₁₀ 1E ₁₈₀ 1Б ₁₁₀	13,7	25	85	150...250	88,5	1
ОТНР-2	–	–	–	–	–	–	–
АР	4C ₁₉₀ 3C ₁₃₀ 3E ₁₉₀ +Б ₇₀	16,0	28	111	190	6,9	1
<i>Ельник черничный</i>							
УО-1	6E ₁₄₀ 3C ₁₇₀ 1Б ₁₁₀	16,6	20	185	110...170	10,6	–
УО-2	9E ₁₉₀ 1C ₁₆₀ 1Б ₁₂₀	19,5	23	218	170...190	1,2	2
ОТНР-1	5E ₁₅₀ 2E ₁₅₀ 2C ₁₆₀ 1Б ₁₁₀	20,3	24	219	130...200	56,9	1
ОТНР-2	5E ₁₃₀ 1E ₁₉₀ 2C ₁₅₀ 1Б ₁₁₀	18,5	26	254	110...130	1,8	1
АР	4E ₁₅₀ 3E ₉₀ 2C ₁₇₀ 1Б ₁₁₀	20,3	24	214	130...200	29,5	1
<i>Ельник долгомошный</i>							
УО-1	7E ₁₆₀ 2C ₁₇₀ 1Б ₁₁₀	16,0	20	134	140...210	18,7	–
УО-2	8E ₁₇₀ 1C ₁₈₀ 1Б ₁₁₀	18,0	22	183	170...180	20,9	1
ОТНР-1	6E ₁₇₀ 2E ₁₁₀ 1C ₁₇₀ 1Б ₁₁₀	19,5	24	190	150...190	58,9	1
ОТНР-2	–	–	–	–	–	–	–
АР	3E ₁₃₀ 3E ₂₀₀ 2C ₂₀₀ 2Ос ₁₃₀ 1Б ₁₃₀	17,0	20	190	130	1,5	1

Примечание: УО-1, УО-2 – условно-одновозрастный (подтипы 1 и 2 соответственно); ОТНР-1, ОТНР-2 – относительно-разновозрастный (подтипы 1 и 2 соответственно); АР – абсолютно-разновозрастный.

С учетом типологической представленности сосняков и ельников в разрезе типов возрастных структур и диапазона возрастов условно-одновозрастных насаждений в границах модельного участка требуется заложить 21 ППП. На текущий момент здесь уже создано 6 ППП. Их характеристики приведены в табл. 4. В верхней половине строки дана характеристика выдела по материалам лесоустройства, а в нижней – ППП, созданной в его границах.

Таблица 4

Основные характеристики пробных площадей в границах модельного участка 2
Main characteristics of the sample plots within the boundaries of the model site 2

Квар-тал/ выдел № ППП	Год учета	Пло- щадь, га	Состав и структура	Тип леса	Класс возраста	За- пас, м ³ /га	Бо- нитет	Тип возрастной структуры
36 / 30 1	2014	17,0	6C ₁₉₀ 2C ₁₃₀ 1E ₁₁₀ 1B ₁₁₀	Со- сняк брус- нич- ный	X	166	IV	ОТНР-1
	2017	0,7	4,2C ₁₈₀ 1,8C ₈₀ 1,3C ₁₄₀ 0,6C ₃₁₀ 0,2E ₆₀ 1,9B ₉₀		IX	145	IV	АР
36 / 23 2	2014	6,8	5E ₁₅₀ 2E ₉₀ 2C ₁₇₀ 1B ₁₁₀ + Ос ₁₁₀	Ель- ник чер- нич- ный	VIII	254	IV	ОТНР-1
	2017	0,6	4,0E ₁₁₀ 1,7C ₃₁₀ 1,4E ₂₅₀ 0,7C ₁₂₀ 1, 2B ₉₀ 1Ос ₉₀		VI	235	V	АР
36 / 24 3	2014	12,0	6C ₂₃₀ 2C ₁₁₀ 1E ₁₁₀ 1B ₉₀	Со- сняк брус- нич- ный	XII	181	V	ОТНР-1
	2016	0,6	5,2C ₂₉₀ 2,9C ₁₁₀ 0,8E ₁₁₀ 0,3C ₇₀ 0,8B ₈₀		XV	157	V	ОТНР-1
36 / 15 4	2014	4,3	4E ₁₉₀ 3E ₁₁₀ 2C ₁₉₀ 1B ₁₁₀	Ель- ник чер- нич- ный	X	175	V	АР
	2017	0,4	4,5E ₂₂₀ 1,6C ₃₁₀ 2E ₁₄₀ 1,3C ₁₄₀ 0,6B ₁₃₀		XI	160	V	АР
36 / 32 5	2014	9,0	7C ₂₁₀ 2C ₁₁₀ 1B ₁₁₀	Со- сняк брус- нич- ный	XI	155	V	ОТНР-1
	2019	0,8	8C ₃₁₀ 1C ₁₁₀ 0,4E ₁₁₀ 0,6B ₈₀		XVI	123	V	ОТНР-1
35 / 3 10	2014	5,6	5C ₂₁₀ 4C ₁₁₀ 1B ₇₀ + E ₁₁₀	Со- сняк брус- нич- ный	XI	134	V	ОТНР-1
	2016	0,4	3,7C ₁₁₀ 3,3C ₁₈₀ 1,8C ₂₃₀ 0,5C ₃₁₀ 0,1E ₁₀₀ 0,6B ₈₀ Ос _{ед}		VI	138	V	АР

Анализируя данные табл. 4, следует отметить, что при последнем лесоустройстве заповедника (2013–2015 гг.) в ходе таксации разновозрастных сосняков выделялось, как правило, не более 2 поколений сосны, возраст старшего поколения зачастую занижался. Подробная таксация на ППП позволила выявить крайне немногочисленное поколение сосны с возрастом более 300 лет как в сосняках, так и в ельниках. Последнее вполне объяснимо и свидетельствует о том, что после некоего катастрофического воздействия пионерной породой на данном участке была сосна. Затем, с задержкой в несколько десятилетий, сформировался ярус ели, которая в дальнейшем успешно возобновлялась.

Модельный участок 3. Выделен в сильно заболоченных депрессиях кристаллического фундамента с ярко выраженным преобладанием сосновых местообитаний. В связи с особенностями рельефа и почвенно-гидрологических условий для данной модельной территории характерна наивысшая по сравнению с другими участками доля нелесных земель (35,5 %). Свыше 60 % сосняков и ельников представлены черничным типом леса. Распределение хвойных древостоев по типам возрастных структур на участке в разрезе выбранных для мониторинга типов леса приведено в табл. 5.

Таблица 5

Распределение сосняков и ельников в границах модельного участка 3 по типам возрастных структур
Distribution of pine and spruce forests within the boundaries of model plot 3 by age structure types

Тип возрастной структуры	Состав и структура	Средние		Запас, м ³ /га	Диапазон возраста, лет	Площадь, %	Количество ППП, шт.
		высота, м	диаметр, см				
<i>Сосняк вересковый</i>							
УО-2	10C ₁₅₀	14,0	16	124	110...150	31,3	2
ОТНР-1	6C ₂₁₀ 4C ₁₃₀ +E ₁₅₀	17,5	26	132	210	23,5	1
ОТНР-2	7C ₁₃₀ 3C ₁₉₀ +E ₁₅₀	16,5	18	181	110...130	45,2	1
АР	–	–	–	–	–	–	–
<i>Сосняк брусничный</i>							
УО-2	10C ₁₇₀ +E ₁₅₀	18,3	26	140	110...250	19,8	3
ОТНР-1	6C ₁₉₀ 3C ₁₄₀ 1Б ₆₀	18,5	28	154	110...250	27,7	1
ОТНР-2	7C ₁₅₀ 2C ₂₂₀ 1E ₁₅₀	17,3	22	159	105...170	49,9	1
АР	4C ₁₉₀ 3C ₁₃₀ 2E ₁₄₀ 1Б ₈₀	20,0	30	152	190	2,6	1
<i>Сосняк черничный</i>							
УО-1	6C ₁₅₀ 3E ₁₃₀ +Б ₉₀	18,4	25	177	35...230	16,5	–
УО-2	9C ₁₇₀ 1E ₁₃₀	19,8	27	213	35...230	28,5	4
ОТНР-1	6C ₁₇₀ 3C ₁₁₀ 1E ₁₁₀	20,6	27	199	115...250	13,7	1
ОТНР-2	6C ₁₃₀ 3C ₂₁₀ 1E ₁₁₀ +Б ₉₀	18,9	23	219	65...160	34,4	1
АР	4C ₂₁₀ 2C ₁₄₀ 3E ₁₅₀ 1Б ₉₀	19,8	34	162	75...230	6,9	1

Окончание табл. 5

Тип возрастной структуры	Состав и структура	Средние		За- пас, м ³ /га	Диапазон возраста, лет	Пло- щадь, %	Коли- чество ППП, шт.
		высота, м	диа- метр, см				
<i>Сосняк багульниковый</i>							
УО2	10C ₁₇₀ +E ₁₇₀	12,2	19	75,0	35...210	60,6	4
ОТНР-1	7C ₂₁₀ 3C ₁₅₀ +E ₁₅₀	13,0	22	64,0	130...210	26,9	1
ОТНР-2	6C ₁₁₀ 3C ₁₉₀ 1E ₁₃₀	12,0	14	95	55...110	12,5	1
АР	–	–	–	–	–	–	–
<i>Сосняк долгомошный</i>							
УО-1	6C ₁₅₀ 3E ₁₂₀ 1Б ₁₀₀	16,2	22	131	85...210	78,8	1
УО-2	8C ₁₉₀ 1E ₁₇₀ 1Б ₈₀	15,0	22	111	170...190	9,7	2
ОТНР-1	–	–	–	–	–	–	–
ОТНР-2	–	–	–	–	–	–	–
АР	4C ₁₅₀ 2C ₉₅ 3E ₁₁₀ 1Б ₈₀	18,0	26	181	150	11,5	1
<i>Ельник черничный</i>							
УО-1	6E ₁₅₀ 3E ₁₈₀ 1Б ₁₀₀	17,4	19	161	110...170	41,8	–
УО-2	8E ₁₅₀ 1C ₁₅₀ 1Б ₉₀	17,0	18	138	150	10,1	2
ОТНР-1	5E ₁₉₀ 3E ₁₃₀ 2C ₁₉₀	20,0	24	176	190	2,1	1
ОТНР-2	5E ₁₄₀ 2E ₁₉₀ 3C ₂₀₀	16,0	17	141	140...150	16,1	1
АР	4E ₁₇₀ 3E ₁₃₀ 3C ₁₇₀	19,2	23	173	150...190	29,9	1
<i>Ельник долгомошный</i>							
УО-1	6E ₁₄₀ 3C ₁₆₀ 1Б ₉₀	17,4	20	176	115...170	63,0	–
УО-2	8E ₁₇₀ 1C ₁₉₀ 1Б ₉₀	16,5	19	144	170	10,2	2
ОТНР-1	–	–	–	–	–	–	–
ОТНР-2	8E ₁₅₀ 2E ₁₉₀ +C ₁₉₀ +Б ₉₀	16,0	16	115	150	4,3	1
АР	4E ₁₉₀ 3E ₁₃₀ 2C ₁₉₀ 1Б ₉₀	18,0	22	125	115...190	22,5	1

В границах данного модельного участка работы по созданию ППП еще не проводились. С учетом типологической и возрастной структуры лесов здесь требуется заложить не менее 36 ППП.

Модельный участок 4. Расположен на компактном массиве песчаных водно-ледниковых отложений с преобладанием сосновых местообитаний. В структуре сосняков высока доля лишайниковой группы типов леса (21,0 %), характеризующейся максимально широким возрастным диапазоном условно-одновозрастных насаждений, и слабо представлена долгомошная группа (0,8 %). Частота пожарных нарушений значительная, и абсолютно-разновозрастные сосняки, по всей видимости, не успевают сформироваться. Поэтому данный тип возрастной структуры отмечен преимущественно для ельников. Варианты типов возрастных структур и типов леса, в которых планируется закладка ППП, представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Распределение сосняков и ельников в границах модельного участка 4
по типам возрастных структур**
**Distribution of pine and spruce forests within the boundaries of model plot 4
by age structure types**

Тип возраст- растной структуры	Состав и структура	Средние		За- пас, м ³ /га	Диа- пазон возрас- та, лет	Пло- щадь, %	Коли- чество ППП, шт.
		высо- та, м	диа- метр, см				
<i>Сосняк вересковый</i>							
УО-2	10C ₁₅₀	17,8	19,0	177	25...210	32,7	4
ОТНР-1	7C ₂₅₀ 3C ₁₄₀	18,0	37,1	122	190...250	21,0	1
ОТНР-2	7C ₁₅₀ 3C ₂₂₀	16,9	18,5	154	130...150	46,3	1
АР	—	—	—	—	—	—	—
<i>Сосняк брусничный</i>							
УО-2	10C ₁₇₀ +E ₁₅₀	20,0	26,0	202	65...210	36,0	3
ОТНР-1	7C ₂₁₀ 3C ₁₄₀	20,0	32,0	162	190...270	35,5	1
ОТНР-2	6C ₁₅₀ 3C ₂₂₀ 1E ₁₃₀ +Б ₉₀	17,8	20,0	168	130...150	28,5	1
АР	—	—	—	—	—	—	—
<i>Сосняк черничный</i>							
УО-1	7C ₁₇₀ 3E ₁₄₀ +Б ₇₀	20,6	26,0	200	150...190	39,7	—
УО-2	10C ₁₅₀ +E ₁₂₀	20,3	24,0	232	130...250	36,0	2
ОТНР-1	6C ₂₁₀ 2C ₁₃₀ 2E ₁₃₀ +Б ₈₀	21,7	34,0	170	180...250	7,5	1
ОТНР-2	6C ₁₅₀ 3C ₂₃₀ 1E ₁₃₀ +Б ₉₀	19,3	23,0	202	140...170	14,3	1
АР	3C ₁₄₀ 3C ₁₉₀ 3E ₁₃₀ 1Б ₉₀	19,0	22,0	206	140...210	2,5	1
<i>Сосняк багульниковый</i>							
УО-2	10C ₁₉₀ +E ₁₅₀	3,3	22,0	75,5	150...230	33,9	2
ОТНР-1	6C ₂₁₀ 3C ₁₄₀ 1E ₁₃₀	13,8	24,0	66,1	210...250	59,6	1
ОТНР-2	8C ₁₃₀ 2C ₁₉₀	12,0	14,0	69,0	130	6,5	1
АР	—	—	—	—	—	—	—
<i>Ельник черничный</i>							
УО-1	6E ₁₆₀ 3C ₁₈₀ 1Б ₉₀	18,4	22,0	192	150...170	13,6	—

Окончание табл. 6

Тип возраст- растной структуры	Состав и структура	Средние		За- пас, м ³ /га	Диа- пазон возрас- та, лет	Пло- щадь, %	Коли- чество ППП, шт.
		высо- та, м	диа- метр, см				
<i>Ельник черничный</i>							
УО-2	8E ₁₅₀ 1C ₁₇₀ 1Б ₉₀	17,0	18,0	150	130...150	6,0	1
ОТНР-1	5E ₁₇₀ 2E ₁₂₀ 2C ₁₇₀ 1Б ₉₀	20,5	26,0	214	170...190	20,7	1
ОТНР-2	–	–	–	–	–	–	–
АР	4E ₁₉₀ 2E ₁₂₀ 3C ₁₉₀ 1Б ₉₀	20,8	25,0	184	170...190	59,7	1
<i>Ельник долгомошный</i>							
УО-1	6E ₁₇₀ 2C ₁₈₀ 2Б ₈₀	17,1	20,0	140	150...190	50,0	–
УО-2	8E ₁₅₀ 1C ₁₇₀ 1Б ₉₀	16,5	19,0	127	150...190	33,1	2
ОТНР-1	5E ₁₇₀ 2E ₁₂₀ 2C ₁₇₀ 1Б ₉₀	19,7	24,0	183	170...190	10,9	1
ОТНР-2	–	–	–	–	–	–	–
АР	4E ₁₃₀ 3E ₁₇₀ 2C ₁₅₀ 1Б ₉₀	16,0	18,0	150	130	6,0	1

Максимальный охват всего разнообразия типов леса, возрастных этапов и типов возрастных структур потребует закладки в границах модельного участка не менее 27 ППП. В настоящее время здесь заложено 6 пробных площадей, характеристики которых приведены в табл. 7.

Данные табл. 7 говорят о хорошем соответствии характеристик выдела и заложенной в нем ППП. Только в одном случае (ППП 13) требуется корректировка данных о подтипе возрастной структуры в связи с неточной глазомерной оценкой возраста. Информация по подросту на ППП свидетельствует, что для сосняков лишайниковых и вересковых в условиях интенсивного пожарного режима характерно обильное естественное возобновление сосны, когда численность жизнеспособного подроста достигает 5–8 тыс. шт./га. В сосняке брусничном, находящемся на 2-м этапе условно-однообразной стадии сукцессии (ППП 21), также было учтено значительное количество жизнеспособного подроста сосны (≈ 3 тыс. шт./га). Однако уже при переходе к 3-му этапу (ППП 24) численность подроста сокращается на порядок.

Таким образом, опыт закладки ППП в девственных сосняках заповедника показывает, что в них может быть выделено до 4 поколений сосны. Это неизбежно ведет к перекалфикации части относительно-разновозрастных насаждений в абсолютно-разновозрастные. Данный факт важно учитывать при характеристике и моделировании спонтанной динамики малонарушенного таежного массива.

Таблица 7

Основные характеристики пробных площадей в границах модельного участка 4
Main characteristics of the sample plots within the model site boundaries 4

Квар-тал/ выдел № ППП	Год уче-та	Пло-щадь, га	Состав и структура	Тип леса	Класс воз-раста	Запас, м ³ /га	Бони-тет	Тип возрастной структуры
152 / 27 № 11	2014	3,8	7C ₂₃₀ 3C ₁₅₀	Сосняк брус-ничный	XII	166,0	IV	ОТНР-1
	2018	0,5	8,5C ₂₁₀ 0,8C ₃₁₀ 0,5C ₁₅₀ 0,2C ₇₀ E _{ед}		XI	207,0	IV	ОТНР-1
151 / 21 № 12	2014	5,3	4E ₁₉₀ 3E ₁₃₀ 3C ₁₉₀	Ельник чернич-ный	X	190,0	IV	АР
	2018	0,4	4,4E ₁₈₀ 2,6E ₂₄₀ 1,9C ₁₉₀ 0,4C ₂₅₀ 0,1E ₁₁₀ 0,6B ₁₂₀		IX	285,3	IV	АР
152 / 17 № 13	2014	8,4	8C ₂₁₀ 2C ₁₅₀	Сосняк верес-сковый	XI	166,0	V	ОТНР-1
	2018	0,5	6C ₁₃₀ 4C ₃₆₀	Сосняк лишай-нико-вый	XVIII	135,5	V	ОТНР-2
152 / 17 № 21	2014	15	10C ₆₅	Сосняк брус-ничный	IV	95,0	V	УО-2
	2019	0,2	9C ₈₀ 1C ₄₇₀		IV	176,5	V	УО-2
152 / 10 № 22	2014	6,5	10C ₂₅	Сосняк бело-мош-ный	II	13,0	V	УО-2
	2019	0,3	10C ₄₀ +B ₄₀		II	27,2	V	УО-2
152 / 23 № 24	2014	10,	10C ₁₇₀	Сосняк брус-ничный	IX	193,0	V	УО-2
	2019	0,3	9C ₁₄₀ 1C ₃₅₀ E _{120 ед}		VII	187,0	V	УО-2

Итак, систему лесного мониторинга в заповеднике планируется разви- вать на базе ландшафтно-типологического и пропорционального простран- ственно-временного подходов с учетом субландшафтной структуры его при- родно-территориального комплекса, а также особенностей распределения лесов по степени их антропогенной нарушенности, преобладающим породам, типам леса и типам возрастных структур. Реализация указанных подходов на базе выбранных модельных территорий должна обеспечить создание системы ППП, отражающей естественную структуру покрытой лесом части заповедни- ка. Площадь модельных территорий (6448 га) составляет 13,1 % от общей пло- щади заповедника. Доли выбранных для закладки ППП 5 типов леса по сосне и 2 типов леса ели занимают соответственно 98,9 и 95,8 % в площадной струк- туре типологического спектра сосновых и еловых ценозов. Базовым элементом данной системы выступает ППП, заложенная в одном из выбранных типов леса и характеризующая этап сукцессионного цикла и фазу естественной динамики лесной экосистемы. Методика подбора насаждения для закладки ППП вклю-

чает в себя ряд этапов камеральных и полевых работ. В первую очередь при помощи выделной цифровой картографической базы данных формируется выборка выделов, удовлетворяющая поставленным требованиям. Такая работа уже выполнена: для визуализации пространственного распределения потенциальных объектов в ходе закладки ППП в разрезе модельных территорий, типов леса и возрастных структур сосняков и ельников было создано 59 вариантов тематических карт. В дальнейшем отобранные выделы таксируются в натуре глазомерно-измерительным способом [10]. ППП закладывается в наиболее типичном по комплексу таксационных параметров для данного типа леса, типа возрастной структуры и фазы естественной динамики выделе.

Всего в заповеднике «Костомукшский» в малонарушенных хвойных биогеоценозах требуется 84 ППП (12 ППП уже созданы в 2016–2019 гг.). В итоге малонарушенные хвойные биогеоценозы в разрезе типов леса должны быть представлены следующим количеством ППП: 60 сосняков, в т. ч. 10 вересковых, 16 брусничных, 17 черничных, 4 долгомошных и 13 багульниковых; 24 ельника, в т. ч. 13 черничных и 11 долгомошных. Заявленный пропорциональный подход соблюдается и позволяет охватить все этапы большого сукцессионного цикла, но распределение ППП по категориям оказывается неравномерным.

Кроме ППП, отмеченных в табл. 4 и 7, в настоящее время также заложено 12 ППП в антропогенно измененных лесах заповедника. Для полноты получаемых экспериментальных данных, видимо, потребуется закладка не менее 2 ППП в березовых насаждениях. По завершении работ общая численность ППП в составе сети лесного мониторинга заповедника «Костомукшский» должна составить не менее 98 шт.

Заключение

В настоящей статье представлены концептуальные основы и базовые параметры программы развития сети лесного мониторинга в заповеднике «Костомукшский». Предложенные ландшафтно-типологический и пространственно-временной подходы учитывают структуру природно-территориального комплекса заповедника на субландшафтном уровне, а также особенности пространственно-возрастного распределения лесов исследуемой территории по преобладающим породам, типам леса и типам возрастных структур. На предварительном этапе формирования сети мониторинга был осуществлен всесторонний анализ структурных характеристик лесного массива заповедника. Уточнены пространственные особенности дислокации малонарушенных и производных лесов, типологическая и породно-возрастная структуры лесов, в т. ч. по типам возрастных структур. Полученные данные позволили определить районы заповедника, где локализованы массивы малонарушенных или производных лесов, выполнить предварительный подбор объектов (выделов) в разрезе необходимых типов леса и фаз сукцессионного цикла. Необходимо сконцентрировать усилия на наиболее полном представлении в сети мониторинга малонарушенных сосняков и ельников тех типов леса, фаз и подфаз возобновительной динамики, которые наилучшим образом будут характеризовать природную динамику лесного массива. Уже сегодня формируемая система лесного мониторинга заповедника «Костомукшский» служит пространственным каркасом для проведения широкого круга работ по изучению потенциала не-

древесных ресурсов леса, биологического разнообразия и видового состава сообществ сосудистых растений, мхов, лишайников, насекомых, грибов и иных групп организмов. Таким образом, можно утверждать, что в границах крупных особо охраняемых территорий лесной зоны именно сеть лесного мониторинга должна служить пространственной основой для организации комплексных исследований наземных экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Волков А.Д. Биоэкологические основы эксплуатации ельников северо-запада таежной зоны России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 250 с.
Volkov A.D. *Bioecological Principles of Boreal Spruce Forest Management in the North-West of Russia*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2003. 250 p. (In Russ.).
2. Громцев А.Н. Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 238 с.
Gtromtsev A.N. *Basic Principles of Landscape Ecology of European Boreal Forests*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2008. 238 p. (In Russ.).
3. Громцев А.Н. Леса заповедника «Костомукшский»: структура, динамика, ландшафтные особенности // Тр. КарНЦ РАН. 2009. № 2. С. 71–78.
Gromtsev A.N. Forests of the Nature Reserve “Kostomukshsky”: Structure, Dynamics, Landscape Peculiarities. *Proceedings of Karelian Research Centre RAS*, 2009, no. 2, pp. 71–78. (In Russ.).
4. Дыренков С.А. Структура и динамика таежных ельников. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1984. 174 с.
Dyrenkov S.A. *Structure and Dynamics of Boreal Spruce Forests*. Leningrad, Nauka Publ., 1984. 174 p. (In Russ.).
5. Зябченко С.С. Сосновые леса Европейского Севера. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1984. 248 с.
Zabchenko S.S. *Pine Forests of European North*. Leningrad, Nauka Publ., 1984. 248 p. (In Russ.).
6. Классификация и диагностика почв России / авт. и сост. Л.Л. Шишов, В.В. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
Shilov L.L., Tonkonogov V.V., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Soils Classification and Diagnostics in Russia*. Smolensk, O'kumena, 2004. 342 p. (In Russ.).
7. Коровин Г.Н., Голованов А.С., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д., Неведьев В.В. Лесные ресурсы: динамика, прогнозирование и оптимальное управление / науч. ред. М.Д. Корзухин; РАН ЦЭПЛ. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. 176 с.
Korovin G.N., Golovanov A.S., Zukert N.V., Korzukhin M.D., Nefedjev V.V. *Forest Resources: Dynamics, Forecasting and Optimal Management*. Moscow, CEPL RAS Publ., 2013. 176 p. (In Russ.).
8. Лесотаксационные таблицы / сост. Н.И. Казимиров, В.В. Кабанов. Петрозаводск: Карелия, 1976. 32 с.
Kazimirov N.I., Kabanov V.V. *Forest Survey Tables*, Petrozavodsk. Karelia, 1976. 32 p. (In Russ.).
9. Методическое пособие по организации и ведению лесного мониторинга на особо охраняемых природных территориях Северо-Запада России (на примере НП «Водлозерский») / сост. В.А. Ананьев, Б.В. Раевский; ИЛ КарНЦ РАН, Нац. парк «Водлозерский». Петрозаводск, 2010. 42 с.
Ananyev V.A., Raevsky B.V. *Guidelines for Forest Monitoring Network Development in Protected Areas in the North-West Russia (by the example of Vodlozersky National Park)*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2010. 42 p. (In Russ.).

10. Наставление по отводу и таксации лесосек в лесах Российской Федерации: утв. приказом Федер. службы лесн. хоз-ва РФ от 15 июня 1993 г. № 155. М.: ЮНИФИР: Всерос. науч.-исслед. информ. центр по лесн. ресурсам, 1993. 71 с.
- Guidelines for Forest Assessment of Cutting Areas in Russian Federation.* Approved by the order of the Federal Forestry Service of the Russian Federation from June 15, 1993, no. 155. Moscow, UNIFIR, All-Russian Scientific and Research Information Center for Forest Resources Publ., 1993. 71 p. (In Russ.).
11. *Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир, 1975. 741 с.
- Odum U. *Basic Principles of Ecology.* Moscow, Mir Publ., 1975. 741 p. (In Russ.).
12. Полевая геоботаника / под общ. ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. Т. 3. М.; Л.: АН СССР, 1964. 530 с.
- Lavrenko E.M., Korchagin A.A. *Field Geobotany.* Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the Soviet Union Publ., 1964. 530 p. (In Russ.).
13. *Раевский Б.В.* Сравнительный анализ структурных особенностей лесного фонда заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» // Тр. КарНЦ РАН. 2017. № 4. С. 3–14.
- Raevsky B.V. Comparative Analyses of Forest Lands Structure of the Nature Reserve “Kostomukshskiy” and the Nature Park “Kalevalskiy”. *Proceedings of Karelian Research Centre RAC*, 2017, no. 4, pp. 3–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/them532>
14. *Стороженко В.Г.* Сукцессионная динамика коренных разновозрастных ельников Европейской России // Вопр. лесн. науки. 2021. Т. 4, № 3. Ст. № 89. Режим доступа: <https://jfsi.ru/4-3-2021-storozhenko/> (дата обращения: 16.10.23).
- Storozhenko V.G. Succession Dynamics of Native Spruce forests of Different Ages in European Russia. *Voprosy lesnoy nauki*, 2021, vol. 4, no. 3, art. 89. (In Russ.).
15. *Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г.* Справочник таксатора: таблицы для таксации леса. 2-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 457 с.
- Tretyakov N.V., Gorskiy P.V., Samoylovich G.G. *Forest Survey Data Book.* Moscow, Timber industry Publ., 1965. 457 p. (In Russ.).
16. *Федорчук В.Н., Кузнецова М.Л., Андреева А.А., Мосеев Д.В.* Резерват “Вепский лес”. Лесоводственные исследования. СПб.: СПбНИИЛХ, 1998. 208 с.
- Fedorchuk V.N., Kusnetsova M.L., Andreeva A.A. *Nature Reserve “Vepskiy les”. Forestry investigations.* Saint-Petersburg, SPbFRI Publ., 1998. 208 p. (In Russ.).
17. *Федорчук В.Н., Шорохов А.А., Шорохова Е.В., Кузнецова М.Л., Тетюхин С.В.* Массивы коренных еловых лесов: структура, динамика, устойчивость. СПб.: Политехн. ун-т, 2012. 135 с.
- Fedorchuk V.N., Schorokhov A.A., Schorokhova E.V., Kusnetsova M.L., Tetuhin S.V. *Primeval Forest Tracts: Structure, Dynamics, Stability.* Saint-Petersburg, Polytechnic university Publ., 2012. 135 p. (In Russ.).
18. *Чумаченко С.И., Смирнова О.В.* Моделирование сукцессионной динамики насаждений // Лесоведение. 2009. № 6. С. 3–17.
- Chumachenko S.I., Smirnova O.V. Modeling of the Forest Succession Dynamics. *Lesovedenie*, 2009, no. 6, pp. 3–17. (In Russ.).
19. Clements F.E. Nature and Structure of the Climax. *Journal of Ecology*, 1936, vol. 24, no. 1, pp. 252–284. <https://doi.org/10.2307/2256278>
20. Schmidt-Vogt H. Struktur und Gynamik naturlicher Fichtenwalder in der borealen Nadelwaldzone. *Schweiz. Z. Forstwes*, 1985, vol. 136, no. 12, pp. 977–994. (In Germ.).

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*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-102-113

Относительная высота деревьев в изолированных популяциях сосновых древостоев

А.Н. Соболев¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

П.А. Феклистов², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Н.А. Неверов², канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

С.С. Макаров³, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

¹Соловецкий государственный историко-архитектурный и природный музей-заповедник, пос. Соловецкий, Приморский р-н, Архангельская обл., Россия, 163000; alex-sobol@mail.ru


²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru[✉], na-neverov@yandex.ru

³Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127434; s.makarov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 10.08.21 / Одобрена после рецензирования 23.11.21 / Принята к печати 26.11.21

Аннотация. Проведено исследование относительной высоты деревьев в сосняках брусничных, черничных и сфагновых на о-ве Большом Соловецком, самом значительном по площади в Соловецком архипелаге и в Белом море. Архипелаг является объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. Относительная высота – важный показатель, характеризующий рост древесных растений и отражающий, на сколько сантиметров прирастает высота на сантиметр диаметра. Заложено 34 пробных площади в наиболее распространенных типах леса – сосняках брусничных, черничных и сфагновых, занимающих 82,0 % от всей территории сосняков. На каждой пробной площади подобраны учетные деревья (по 64 дерева), у которых выполнены измерения высот, диаметров, взяты керны возрастным буравом у шейки корня для определения возраста. Всего в анализе относительной высоты использовано 2176 деревьев. Средняя относительная высота в сосняках брусничных, черничных и сфагновых на о-ве Б. Соловецком составляет соответственно 62,5; 61,5 и 54,7 см/см. Такой показатель заметно меньше, чем в сосняках на материке в Архангельской области. Там значения составляют 84,9; 84,9 и 79,2 см/см для соответствующих типов леса. Применять существующие таблицы хода роста, разработанные по материалам исследования материковых деревьев, для островных сосняков нельзя. Получены уравнения для определения относительной высоты сосняков о-ва Б. Соловецкого. В качестве входного параметра предлагается использовать диаметр деревьев, а не возраст, т. к. определение возраста значительно труднее, чем диаметра на высоте груди.

© Соболев А.Н., Феклистов П.А., Неверов Н.А., Макаров С.С., 2023

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

Ключевые слова: относительная высота деревьев, сосняки, остров Большой Соловецкий, диаметр деревьев, высота деревьев, тип леса, возраст деревьев

Благодарности: Исследования проведены в ходе выполнения госзадания № 122011300380-5 ФИЦКИА им. Н.П. Лавёрова УрО РАН.

Для цитирования: Соболев А.Н., Феклистов П.А., Неверов Н.А., Макаров С.С. Относительная высота деревьев в изолированных популяциях сосновых древостоев // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 102–113. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-102-113>

Original article

Relative Tree Height in Isolated Populations of Pine Stands

*Aleksandr N. Sobolev*¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAS-3366-2020](https://orcid.org/0000-0002-7961-8318), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7961-8318>

*Pavel A. Feklistov*², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

*Nikolay A. Neverov*², Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

*Sergey S. Makarov*³, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

¹Solovki State Historical, Architectural and Natural Museum-Reserve, Solovetsky settlement, Arkhangelsk region, 164070, Russian Federation; alex-sobol@mail.ru

²Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences named after N.P. Laverov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru[✉], na-neverov@yandex.ru

³Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127434, Russian Federation; s.makarov@rgau-msha.ru

Received on August 10, 2021 / Approved after reviewing on November 23, 2021 / Accepted on November 26, 2021

Abstract. The study of relative tree height in lingonberry, bilberry and sphagnum pine forests on Bolshoy Solovetsky Island was carried out. The island is the largest by area in the Solovetsky Archipelago and in the White Sea. The archipelago is a UNESCO World Heritage Site. Relative height is an important indicator characterizing the growth of woody plants and reflecting how many centimeters of height growth for each centimeter of diameter. We laid 34 sample plots in the most widespread forest types – lingonberry, bilberry, and sphagnum pine forests, occupying 82.0 % of the total pine forest area. At each sampling area we selected survey trees (64 trees each), measured heights, diameters, and took cores with an age drill at the root neck to determine the age. A total of 2176 trees were used in the relative height analysis. The average relative height in lingonberry, bilberry and sphagnum pine forests on Bolshoy Solovetsky Island is 62.5; 61.5 and 54.7 cm/cm, respectively. This relative height is noticeably lower than in pine forests on the mainland in the Arkhangelsk Oblast. There, the values are 84.9; 84.9 and 79.2 cm/cm for the respective forest types. It is not possible to use the existing growth progress tables developed on the basis of mainland trees for island pine forests. Equations for determining the relative height of pine forests on Bolshoy Solovetsky Island were obtained. It is proposed to use tree diameter rather than age as an input parameter, since the determination of age is much more difficult than that of diameter at breast height.

Keywords: relative tree height, pine forests, Bolshoy Solovetsky Island, tree diameter, tree height, forest type, tree age

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences named after N.P. Laverov (State Registration no. 122011400384-2).

For citation: Sobolev A.N., Feklistov P.A., Neverov N.A., Makarov S.S. Relative Tree Height in Isolated Populations of Pine Stands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 102–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-102-113>

Введение

Большой Соловецкий остров расположен в Белом море на выходе из Онежского залива. С запада остров отделен от материка проливом Западная Соловецкая Салма, с востока – проливом Восточная Соловецкая Салма. Расстояние от Карельского берега – около 40 км, до Онежского полуострова – также примерно 40 км. Это самый крупный остров на Белом море.

Особенности климата Соловецкого архипелага на фоне общей картины климатических характеристик Архангельской области определяются прежде всего его географическим положением, а именно нахождением в середине Белого моря [14]. Климат Соловецких островов можно отнести к умеренно холодному, избыточно влажному. Суммарная радиация немногим более 3000 мДж/м², средняя годовая разность осадков и испаряемости – 200 мм, сумма эффективных температур воздуха более 10 °С – 889 °С. Средняя годовая температура – 0,9 °С. Самый холодный месяц – февраль, самый теплый – июль. Средняя годовая амплитуда температуры, вычисленная как разность средней месячной температуры самого холодного и самого теплого месяцев, равна 23 °С. Ветровой режим отличается сезонной сменой преобладающих направлений движения воздушных масс. В холодное время года в основном дуют ветры с юга, в теплое – с севера. Средняя годовая скорость ветра приближается к 5 м/с. В среднем за год выпадает 547 мм осадков. Островное положение способствует большой влажности воздуха. Относительная влажность воздуха в среднем за год равна 82 %. Сухие дни (относительная влажность менее 30 %) исключительно редки. Число влажных дней с относительной влажностью более 80 % за год достигает 187.

В почвенном покрове Соловецкого архипелага наблюдается большая пестрота, связанная с характером материнских пород, формами рельефа. На возвышенных элементах рельефа на песчаных и супесчаных отложениях формируются почвы подзолистого типа, занимающие 76,0 % лесной площади [6].

Леса образованы преимущественно елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Они занимают соответственно 42 и 34 % покрытой лесом площади. Значима доля березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и извилистой (*B. tortuosa* Ledeb.) На долю осины (*Populus tremula* L.) приходится 5 %. Кроме того, присутствует ель европейская (*Picea abies* L.), но ее встречаемость крайне низка. Преобладают ельники и сосняки, а в типологическом отношении – сосняки и ельники черничные [18] (табл. 1).

Таблица 1

**Распределение покрытых лесом земель Соловецкого лесничества
по типам леса и преобладающим породам
Distribution of forested lands in Solovetsky forestry by predominant species
and types of forest**

Тип сосняка	Площадь по породам, га				Всего	
	Ель	Сосна	Береза*	Осина	га	%
Скальный (–)	2,0	11,2	0	0	13,2	0,1
Лишайниковый (A ₀)	24,2	339,3	179,1	0	542,6	2,8
Брусничный (B ₂)	231,7	2070,7	776,1	57,2	3135,7	16,5
Кисличный (C ₂)	90,0	4,0	179,9	110,7	384,6	2,0
Черничный (B ₃)	7115,2	2489,5	1425,9	783,0	11815,1	62,1
Долгомошный (B ₄)	308,3	307,2	120,9	2,6	739,0	3,9
Травяно-болотный (C ₄)	73,3	39,6	738,3	0,8	852,0	4,5
Сфагновый (A ₃)	136,0	1264,4	79,6	0	1480,0	7,8
Ивняковый (–)	0	0	42,3	0	42,3	0,2
<i>Всего, га</i>	7980,4	6525,9	3542,1	954,3	19004,5	100
<i>(%)</i>	(42,0)	(34,4)	(18,6)	(5,0)		

*Береза пушистая и извилистая.

Начиная с XV в. ельники и сосняки Соловков подвергались антропогенному воздействию, которое носило фрагментарный характер: сплошных рубок не практиковалось, рекреационное воздействие в основном приурочено к аттрактивным центрам и дорогам, уровень посещения лесов невысокий, промышленности нет.

Соловецкий архипелаг является объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. Леса отнесены к защитным, имеющим историческое и научное значение. Вместе с тем изученность лесов недостаточна, и прежде всего с точки зрения формы стволов деревьев. Одна из ее характеристик – относительная высота.

Относительную высоту как показатель светолюбия древесных пород использовал Я.С. Медведев. Им было отмечено, что относительная высота – диагностический признак степени угнетения [10]. Она (см/см) отражает скорость роста в высоту по отношению к скорости роста по диаметру (т. е. на сколько сантиметров увеличивается высота дерева при повышении диаметра на 1 см). В последующем показатель применяли и другие исследователи [4, 12, 17, 19, 23, 24, 26, 30] для различных целей. Например, К.К. Высоцким [5] была проведена оценка на основе данного показателя биологических характеристик насаждений. Возможно рассматривать относительную высоту как важный классификационный признак древостоев и как критерий устойчивости дерева к снеговым и ветровым нагрузкам. Она является дополнительным индикатором формы ствола наряду с традиционными коэффициентами формы: чем больше относительная высота, тем полнодревеснее ствол [9]. Отмечалось влияние типа леса на этот показатель [23]. О влиянии климатических факторов на соотношение «вы-

сота:диаметр» писал еще И.С. Мелехов [10]. Абсолютная и, соответственно, относительная высота деревьев зависит от климата [29]. Следует заметить, что этот вопрос до настоящего времени является актуальным и его научным освещением активно занимаются в других странах [20–22, 26–28, 31, 32]. Таким образом, относительная высота – это очень важная характеристика древостоя. Однако для лесов Большого Соловецкого острова она не изучена.

Цель – исследовать относительную высоту сосновых насаждений в наиболее распространенных типах леса на о-ве Б. Соловецком, выявить ее зависимость от возраста и диаметра деревьев, их распределения по ступеням относительной высоты.

Объекты и методы исследования

На территории Большого Соловецкого острова было заложено 34 пробные площади в наиболее распространенных типах леса: сосняках брусничных, черничных и сфагновых, занимающих 82,0 % территории сосняков. Все они располагаются в координатах 64°58'–65°06' с. ш. 35°46'–36°01' в. д. Древостои сосняков лишайниковых и сфагновых чистые по составу (формула состава – 10 С), а брусничных и черничных – с небольшой примесью березы и осины: 8–9 ед. сосны и 1–2 ед. березы или осины.

Пробные площади закладывали в соответствии с общепринятыми методиками и рекомендациями ГОСТ 16128–70 «Площади пробные лесоустroительные» и ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустroительные» [1, 3, 15]. На пробных площадях выполняли комплекс работ по лесоводственному, таксационному и геоботаническому описанию. На каждой пробной площади подбирали учетные деревья методом случайной выборки (64 шт., всего – 2176 шт.). Для определения возраста деревьев приростным буровом Haglof у шейки корня отбирали керны и при помощи микроскопа МБС-10 устанавливали количество годовичных колец. Измеряли диаметр и высоту стволов всех учетных деревьев. Диаметр – с помощью мерной вилки с точностью до 1 см, высоту – высотометром Suunto с точностью 0,5 м. Относительную высоту рассчитывали как отношение высоты к диаметру (см/см). При обработке полученных данных использовали ранее опубликованные рекомендации [2, 11].

Абсолютное большинство древостоев во всех типах леса разновозрастные (табл. 2). Преобладают циклично-, абсолютно- и условноразновозрастные по классификации Г.Е. Комина [7, 8]. На пробных площадях отмечены отдельные деревья возрастом 350–500 лет, которые также попадали в исследование.

Таблица 2

Распределение пробных площадей (шт.) по типам леса и возрастной структуры
Distribution of sample areas by age structure types

Тип сосняка	Одно-возрастные	Разновозрастные				Средний возраст, лет
		условно-	циклично-	абсолютно-	ступенчато-	
Брусничный	1	1	3	5	1	123,2
Черничный	–	3	5	2	1	109,3
Сфагновый	–	3	7	2	–	114,3

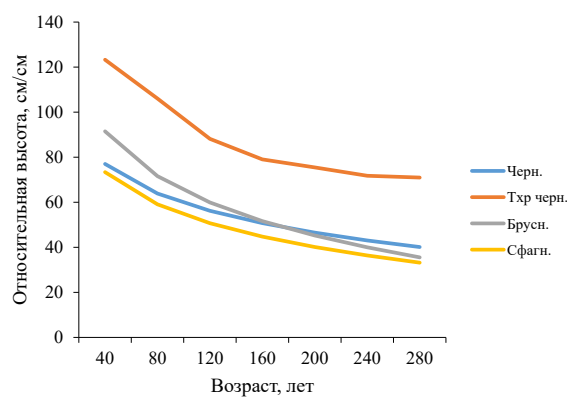
Результаты исследования и их обсуждение

Рост сосняков в Архангельской области достаточно изучен и отражен в таблицах хода роста [13]. Все таблицы хода роста построены по одному принципу, входным показателем является возраст древостоев. Для каждого возраста может быть определена относительная высота, которая с годами уменьшается. Для сосняков о-ва Б. Соловецкого нами получены уравнения по аналогии с таблицами хода роста для сравнения трендов в разных типах леса и сопоставления островных древостоев с материковыми.

Относительная высота в сосняках брусничных и сфагновых на о-ве Б. Соловецком изменяется схожим образом, уменьшаясь в возрастном промежутке от 40 до 280 лет (рис. 1). В выборках были также более молодые деревья и более старые, хотя их количество невелико; они использовались для получения уравнений, но не показаны на графике. Линии тренда для сосняков брусничных и сфагновых почти параллельны, однако в сосняках брусничных относительная высота всегда выше, чем в сфагновых, хотя с возрастом древостоя они сближаются. В сосняках черничных линия тренда в молодых древостоях ниже, чем в сосняках брусничных, а в возрасте более 160 лет – выше. Можно предположить, что, в отличие от сосняков брусничных, в сосняках черничных даже после 160 лет наблюдается существенный прирост в высоту.

Рис. 1. Зависимость относительной высоты от возраста для сосняков: черничного (Черн.) $y = -18,95\ln(x) + 146,91$; брусничного (Брусн.) $y = -28,75\ln(x) + 197,55$ и сфагнового (Сфагн.) $y = -20,65\ln(x) + 149,55$, а также для черничного по таблицам хода роста (Тхр черн.) $y = -28,64\ln(x) + 228,35$

Fig. 1. Dependence of relative height on age for pine forests: bilberry (Черн.) $y = -18.95\ln(x) + 146.91$; lingonberry (Брусн.) $y = -28.75\ln(x) + 197.55$ and sphagnum (Сфагн.) $y = -20.65\ln(x) + 149.55$, as well as for bilberry according to the growth progress tables (Тхр. черн.) $y = -28.64\ln(x) + 228.35$



Похожее изменение относительной высоты деревьев с возрастом отмечено и в сосняках материковой части Архангельской области (рис. 1). Фактически линии на графике параллельны. Однако разница между сосняками с острова и материка весьма существенна и достигает, например, в 40 лет – 46 см/см, а в 280 лет – 31 см/см для сосняков черничных.

Более детальный регрессионный анализ динамики относительной высоты позволяет отметить, что самая тесная связь наблюдается не с возрастом, а с диаметром деревьев. В качестве примера на рис. 2 показано изменение относительной высоты в зависимости от возраста и диаметров деревьев для сосняков брусничных.

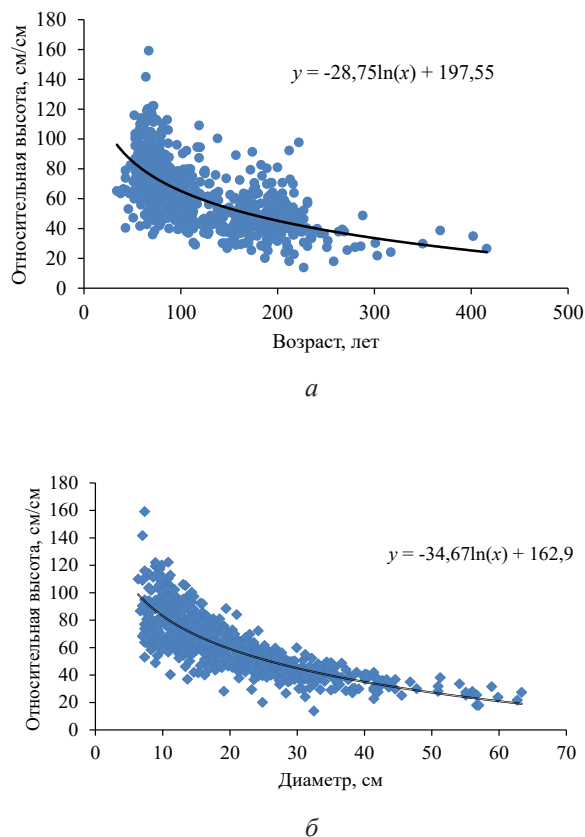


Рис. 2. Зависимость относительной высоты от возраста (а) и диаметра (б) деревьев в сосняках брусничных о-ва Б. Соловецкого

Fig. 2. Dependence of relative height on age (a) and diameter (b) of trees in lingonberry pine forests of B. Solovetsky Island

У других типов леса наблюдается похожая зависимость. Так как определение возраста всегда достаточно трудоемкая работа, а диаметр измеряется легко, то, вероятно, использование диаметра для установления относительной высоты наиболее рационально (табл. 3).

Таблица 3

Зависимость относительной высоты от возраста и диаметра деревьев в разных типах леса на о-ве Б. Соловецком
Dependence of relative height on age and diameter in different forest types on B. Solovetsky Island

Тип сосняка	Возраст, лет		Диаметр, см	
	Уравнение	R ²	Уравнение	R ²
Брусничный	$y = -28,75\ln(x) + 197,55$	0,4148	$y = -34,67\ln(x) + 162,9$	0,6473
Черничный	$y = -18,95\ln(x) + 146,91$	0,347	$y = -32,46\ln(x) + 161,64$	0,6504
Сфагновый	$y = -20,65\ln(x) + 149,55$	0,3519	$y = -28,5\ln(x) + 131,16$	0,4207

Кроме этого, из рис. 2 видно, что в возрасте 50–200 лет, или при диаметрах от 8 до 40 см, наблюдается наибольший разброс значений относительной высоты, а затем она становится стабильной.

Все средние относительные высоты по пробным площадям получены с высокой точностью: стандартная ошибка не выходила за пределы $\pm 5\%$. Изменчивость относительной высоты стабильна в разных типах леса, коэффициент изменчивости – 28–29 % (в сосняке брусничном – 27,7 %; черничном – 28,7 %; сфагновом – 27,8 %). Значения достоверны при уровне значимости 0,01. Критерий Стьюдента выше критических значений. Более подробно это было описано нами ранее [15]. В качестве примера приводим данные по соснякам черничным как наиболее представленному типу леса на Соловках (табл. 4).

Таблица 4

Статистические показатели относительной высоты для сосняков черничных о-ва Б. Соловецкого [16]
Statistical indices of relative height for pine forests bilberry pine forests of B. Solovetsky Island

Показатель	Пробная площадь										
	1/001	2/002	3/003	4/004	5/005	6/065	7/117	8/118	9/119	10/120	11/121
М, см/см	58,7	86,8	67,1	60,6	43,7	56,4	70,3	52,2	59,6	67,1	53,8
m, см/см	2,4	2,5	2,6	2,1	2,0	3,1	2,1	1,6	2,3	2,7	1,9
σ , см/см	17,2	17,8	18,6	14,9	14,6	22,0	17,1	13,2	18,8	21,9	15,0
V, %	29,2	20,6	27,7	24,5	33,5	39,1	24,3	25,3	31,4	32,7	27,8
t	24,5	34,7	25,8	28,9	21,9	18,2	33,5	32,6	25,9	24,8	28,3
P, %	4,1	2,8	3,8	3,4	4,6	5,4	3,0	3,2	3,9	4,1	3,5

Примечание: М – среднее значение; m – ошибка среднего значения; σ – среднеквадратическое отклонение; V – коэффициент вариации; t – достоверность средних значений (критерий Стьюдента); P – точность.

Если сравнивать среднюю относительную высоту по типам леса на о-ве Б. Соловецком с сосняками Архангельской области [13] по таблицам хода роста для разных типов леса, то видно, что показатель для острова примерно на 20–26 см/см ниже в соответствующих типах леса (рис. 3), чем для материка, т. е. на каждый сантиметр диаметра в высоту дерева на о-ве Б. Соловецком прирастают значительно меньше по сравнению с материком. В сосняках брусничных относительная высота в среднем равна $62,5 \pm 4,1$ см/см, очень близка в сосняках черничных – $61,5 \pm 3,4$ см/см и только $54,7 \pm 3,4$ см/см в сосняках сфагновых. Деревья на острове имеют относительную высоту в среднем только около 70 % от показателя материковых сосняков. Следствием этого является то, что стволы деревьев в соловецких сосняках сильносбежистые. Интересно сравнение деревьев от самого сухого типа местопроизрастания к самому влажному – от брусничного к черничному и сфагновому. Самая высокая относительная высота отмечена в брусничном типе, затем она чуть снижается к черничному и резко уменьшается к сфагновому. В последнем случае различия достигают 11 %. Следовательно, среди изученных типов леса наиболее сильносбежистые стволы – у деревьев сфагновых сосняков. В материковых сосняках наблюдается почти такая же закономерность, только при большей средней относительной высоте. Относительные высоты в черничных и брусничных типах здесь одинаковые, а на о-ве Б. Соловецком в черничном типе – чуть ниже. Предположение подтверждается и распределением деревьев в разных типах по группам высот (табл. 5). Из табл. 5 отчетливо видно, что с увеличением количества влаги в почве, т. е. от сухих условий местопроизрастания (брусничные) к влажным (сфагновые), возрастает доля деревьев с пониженной относительной высотой.

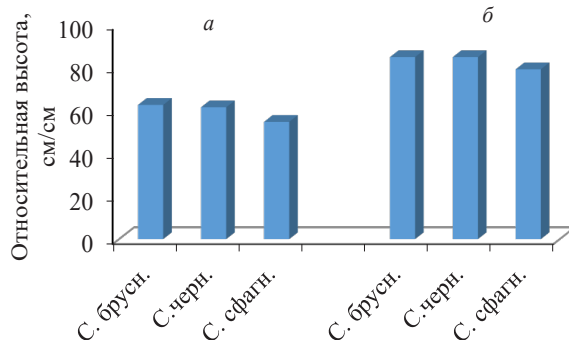


Рис. 3. Изменение относительной высоты по типам леса (в связи с увеличением увлажнения): *a* – о-в Б. Соловецкий; *б* – Архангельская область (с. брусн., с. черн., с. сфагн. – сосняки брусничный, черничный и сфагновый соответственно)

Fig. 3. Change in relative height by forest type (due to increasing moisture content): *a* – B. Solovetsky Island; *б* – Arkhangelsk Oblast (с. брусн., с. черн., с. сфагн. – lingonberry, bilberry and sphagnum pine forests, respectively)

Таблица 5

Распределение деревьев по ступеням относительной высоты в зависимости от типа леса на о-ве Б. Соловецком
Distribution of trees by relative height steps depending on forest type on B. Solovetsky Island

Тип сосняка	Общее количество деревьев, шт.	Ступени относительной высоты, %						Итого, %
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100	101–120	
Брусничный	704	–	7	31	38	18	6	100
Черничный	704	–	13	34	32	17	4	100
Сфагновый	768	1	33	41	22	3	–	100

Причиной низкой относительной высоты деревьев на Соловках является, по нашему мнению, ветровой режим, отличный от материкового. Более сильные ветры тормозят рост в высоту. Отчасти подтверждением этого служит относительная высота в сосняках брусничных, удаленных от Соловецкого архипелага на 200 км. По нашим данным [17], в сосняках брусничных лесопарка «Ягры», расположенного на побережье Двинского залива Белого моря, относительная высота сосны составляет в среднем 60,8 см/см (по данным 50 учетных деревьев). Таксационная характеристика этого сосняка сходна с брусничниками на Соловках (чистый по составу, средний диаметр – 22 см, средняя высота – 11 м). Относительная высота может выступать в качестве показателя, отражающего адаптацию дерева к ветровому режиму. Деревья и древостои с низкой относительной высотой более ветроустойчивы. Такое же мнение высказывалось и в [25].

Выводы

1. Относительная высота деревьев на о-ве Большом Соловецком в среднем составляет соответственно в сосняках брусничных, черничных и сфагновых $62,5 \pm 4,1$; $61,5 \pm 3,4$ и $54,7 \pm 3,4$ см/см. В сосняках сфагновых она ниже, чем в черничных и брусничных, на 11–14 %. Различия достоверны при уровне значимости 0,01 (или вероятности 0,99).

2. Средняя относительная высота в сосняках на о-ве Б. Соловецком значительно меньше, чем на материке.

3. Использовать существующие таблицы хода роста для островных сосняков нельзя, относительную высоту в сосняках о-ва Б. Соловецкого можно определить по диаметру деревьев на основании найденных зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.
Anuchin N.P. *Forest Taxation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).
2. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований. СПб.: Политехн. ун-т, 2016. 125 с.
Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. *Statistical Processing of Forest Research Materials*. Saint-Petersburg, SPbPU Publ., 2016. 125 p. (In Russ.).
3. Бузова Н.В., Феклистов П.А. Антропогенная трансформация пригородных лесов: моногр. Архангельск: АГТУ, 2007. 264 с.
Burova N.V., Feklistov P.A. *Anthropogenic Transformation of Suburban Forests*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 264 p. (In Russ.).
4. Верхунов П.М. Закономерности строения разновозрастных сосняков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 255 с.
Verhunov P.M. *Regularities of the Structure of Pine Forests of Different Ages*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 255 p. (In Russ.).
5. Высоцкий К.К. Закономерности строения смешанных древостоев. М.: Гослесбумиздат, 1962. 177 с.
Vysotsky K.K. *Regularities of the Structure of Mixed Stands*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 177 p. (In Russ.).
6. Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В. Соловецкий лес. Архангельск, 2005. 225 с.
Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prourzin L.I., Torkhov S.V. *Solovetsky Forest*. Arkhangelsk, 2005. 225 p. (In Russ.).
7. Комин Г.Е. К вопросу о типах возрастной структуры насаждений // Изв. вузов. Лесн. журн. 1963. № 3. С. 37–42.
Komin G.E. On the Question of the Types of Age Structure of Plantings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1963, no. 3, pp. 37–42. (In Russ.).
8. Комин Г.Е. Возрастная структура древостоев в лесах России. Сочи: ФГУ НИИГорлесэкол, 2003. 219 с.
Komin G.E. *Age Structure of Stands in the Forests of Russia*. Sochi, FSU Niigorlesekol Publ., 2003. 219 p. (In Russ.).
9. Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 165 с.
Maslakov E.L. *Formation of Young Pine Trees*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 165 p. (In Russ.).
10. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.
Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).
11. Наследов А. SPSS 19: профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Питер, 2011. 400 с.
Nasledov A. *SPSS 19: Professional Statistical Data Analysis*. Saint Petersburg, Piter Publ., 2011. 400 p. (In Russ.).

12. Нагимов В.З., Артемьева И.Н., Нагимов З.Я. Дифференциация и отпад деревьев в сосняках лишайниковых заповедно-природного парка «Сибирские увалы» // Леса России и хоз-во в них. 2007. Вып. 1(29). С. 138–146.

Nagimov V.Z., Artemyeva I.N., Nagimov Z.Ya. Differentiation and Decline of Trees in Lichen-Bearing Pine Forests of the Siberian Uvaly Nature Reserve Park. *Forests of Russia and Economy in Them*, 2007, vol. 1, iss. 29, pp.138–146. (In Russ.).

13. Полевой лесотаксационный справочник / под общ. ред. С.В. Третьякова, С.В. Ярославцева, С.В. Коптева. Архангельск: САФУ, 2016. 252 с.

Tretyakov S.V., Yaroslavtsev S.V., Koptev S.V. *Field Forest Taxing Reference Book*. Arkhangelsk, NARFU Publ., 2016. 252 p. (In Russ.).

14. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

Shvartsman Yu.G., Bolotov I.N. *Natural Environment of the Solovetsky Archipelago in a Changing Climate*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2007. 184 p. (In Russ.).

15. Программа и методика биогеоценологических исследований / под ред. Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1966. 332 с.

Dylis N.V. *Program and Methodology of Biogeocenological Research*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 332 p. (In Russ.).

16. Соболев А.Н., Феклистов П.А. Особенности строения сосновых древостоев на острове Большом Соловецком // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 77–87.

Sobolev A.N., Feklistov P.A. Features of the Structure of Pine Stands on Bolshoy Solovetsky Island. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 1, pp. 77–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-77-87>

17. Феклистов П.А., Евдокимов В.Н., Евдокимова Е.В., Федяев А.Л., Самылов Д.Е., Зубаха С.И. Особенности сосняков лесопарка «Ягры» // Вестн. Помор. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2011. № 1. С. 89–95.

Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Evdokimova E.V., Fedyaev A.L., Samylov D.E., Zubakha S.I. Features of Pine Forests of the Forest Park "Yagry". *Bulletin of the Pomor University. Series: Natural Sciences*, 2011, no. 1, pp. 89–95. (In Russ.).

18. Феклистов П.А., Соболев А.Н. Лесные насаждения Соловецкого архипелага (структура, состояние, рост). Архангельск: САФУ, 2010. 240 с.

Feklistov P.A., Sobolev A.N. *Forest Plantations of the Solovetsky Archipelago (Structure, Condition, Growth)*. Arkhangelsk, NARFU Publ., 2010. 240 p. (In Russ.).

19. Юкнис Р.А. Некоторые закономерности роста деревьев // Моделирование и контроль производительности древостоев: сб. науч. тр. ЛитСХА. Каунас, 1983. С. 118–120.

Yuknis R.A. Some Patterns of Tree Growth. *Modeling and Control of Stand Productivity*. Kaunas, VMU Agriculture Academy Publ., 1983, pp. 118–120. (In Russ.).

20. Bohora S.B., Cao Q.V. Prediction of Tree Diameter Growth Using Quantile Regression and Mixed-Effects Models. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 319, pp. 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.006>

21. Bronisz K., Mehtätalo L. Mixed-Effects Generalized Height–Diameter Model for Young Silver Birch Stands on Post-Agricultural Lands. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 460, art. 117901. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117901>

22. Chenge Iveren B. Height–Diameter Relationship of Trees in Omo Strict Nature Forest Reserve, Nigeria. *Trees, Forests and People*, 2021, vol. 3, art. 100051. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100051>

23. Cysneiros V.C., Pelissari A.L., Gaui T.D., Fiorentin L.D., Daniel C.C., Telmo B.S.F., Sebastião A.M. Modeling of Tree Height–Diameter Relationships in the Atlantic Forest: Effect of Forest Type on Tree Allometry. *Canadian Journal of Forest Research*, 2020, vol. 50, no. 12, pp. 1289–1298. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0060>

24. Erteld W. Groesse und Entwicklung des h/d-Wertes in Kieferbestaenden. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 1979, jg. 150, s. 72–75. (In Germ.).
25. Meng Shawn X., Shongming H., Lieffers V.J., Thompson N., Yuqing Y. Wind Speed and Crown Class Influence the Height–Diameter Relationship of Lodgepole Pine: Nonlinear Mixed Effects Modeling. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 256, iss. 4, pp. 570–577. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.05.002>
26. Mensah S., Pienaar O.L., Kunneke A., Du Toit B., Seydack A., Uhl E., Pretzsch H., Seifert T., Height – Diameter Allometry in South Africa’s Indigenous High Forests: Assessing Generic Models Performance and Function Forms. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 410, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.030>
27. Ng'andwe P., Chungu D., Yambayamba A.M., Chilambwe A. Modeling the Height-Diameter Relationship of Planted Pinus Kesiya in Zambia. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 447, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.051>
28. Rust S. Analysis of Regional Variation of Height Growth and Slenderness in Populations of Six Urban Tree Species using a Quantile Regression Approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, vol. 13, iss. 2, pp. 336–343. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.003>
29. Sharma M., Subedi N., Ter-Mikaelian M., Parton J. Modeling Climatic Effects on Stand Height/Site Index of Plantation-Grown Jack Pine and Black Spruce Trees. *Forest Science*, 2015, vol. 61, iss. 1, pp. 25–34. <https://doi.org/10.5849/forsci.13-190>
30. Thomasius H.O., Butter D. Studie zu einigen Relationen zwischen Wuchsflaeche, Zuwachs und individueller Stabilitaet von Waldbaeumen, dargestellt an der Baumart Fichte. *Beitraege f. d. Forstwirtschaft*, 18, 1984, H. 1. S. 25–28. (In Germ.).
31. Watt M.S., Kirschbaum M.U.F. Moving Beyond Simple Linear Allometric Relationships Between Tree Height, and Diameter. *Ecological Modelling*, 2011, vol. 222, iss. 23–24, pp. 3910–3916. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.10.011>
32. Zheng J., Zang H., Yin S., Sun N., Zhu P., Han Y., Kang H., Liu C. Modeling Height-Diameter Relationship for Artificial Monoculture Metasequoia Glyptostroboides in Sub-Tropic Coastal Megacity Shanghai, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, vol. 34, pp. 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.006>

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*0

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-114-135

Лесоэксплуатационное районирование лесных субарктических территорий

П.В. Будник¹, *д-р техн. наук*; *ResearcherID: E-1782-2015*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-4442>

В.Н. Баклагин², *канд. техн. наук, науч. сотр.*; *ResearcherID: M-2265-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0060-1653>

О.Н. Галактионов¹, *д-р техн. наук*; *ResearcherID: AAE-5888-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; budnikpavel@yandex.ru[✉], ong66@mail.ru

²Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, просп. Александра Невского, д. 50, г. Петрозаводск, Россия, 185030; slava.baklagin@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.23 / Одобрена после рецензирования 03.05.23 / Принята к печати 06.05.23

Аннотация. Цель данного исследования – классификация территорий лесного фонда Республики Карелии и Мурманской области на уровне центральных лесничеств на основе многофакториальной оценки ресурсов древесины, природно-производственных условий и дорожной инфраструктуры. Проведено лесоэксплуатационное районирование с учетом 20 переменных. Для этого последовательно применены факторный и иерархический кластерный анализ, метод *k*-средних и дискриминантный анализ. При помощи статистических методов все центральные лесничества распределены по 9 кластерам: 4 крупных (№ 2, 3, 8, 9), включающих несколько лесничеств, и 5 (№ 1, 4–7), каждый из которых сформирован одним лесничеством. Лесничества кластера № 2 имели большую расчетную лесосеку, значительные запасы леса на гектаре и запасы лиственных пород. Лесничества кластера № 3 характеризовались малыми расчетной лесосекой и запасом леса на гектаре. Для лесничеств кластера № 8 отмечены средние по региону расчетная лесосека и запасы леса на гектаре, высокая доля лесов, находящихся в условиях застойного увлажнения. Лесничества кластера № 9 по своим характеристикам занимали промежуточное положение между лесничествами кластеров № 2 и 8. Лесничество кластера № 1 по своим особенностям близко к лесничествам кластера № 2, но леса в нем продуктивнее. У лесничеств малых кластеров № 4, 6, 7 самый высокий запасы леса на гектаре. Различия по некоторым переменным не позволили объединить их в один кластер. Лесничество кластера № 5 схоже по природно-производственным условиям с лесничествами кластера № 3, однако имело небольшую расчетную лесосеку по хвойному компоненту. Результаты исследования могут быть учтены при решении вопросов организации и развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса в Республике Карелии и Мурманской области.

Ключевые слова: районирование, факторный анализ, кластерный анализ, метод k-средних, дискриминантный анализ, лесозаготовки, управление лесами

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-21-00143, <https://rscf.ru/project/23-21-00143/>.

Для цитирования: Будник П.В., Баклагин В.Н., Галактионов О.Н. Лесоэксплуатационное районирование лесных субарктических территорий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 114–135. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-114-135>

Original article

Forest Exploitation Zoning of Forest Subarctic Territories

Pavel V. Budnik¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [E-1782-2015](https://orcid.org/0000-0002-8701-4442),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-4442>

Vyacheslav N. Baklagin², Candidate of Engineering, Research Scientist;

ResearcherID: [M-2265-2016](https://orcid.org/0000-0002-0060-1653), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0060-1653>

Oleg N. Galaktionov¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [AAE-5888-2020](https://orcid.org/0000-0003-0768-3628),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; budnikpavel@yandex.ru[✉], ong66@mail.ru

²Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, prosp. Alexandra Nevskogo, 50, Petrozavodsk, 185030, Russian Federation; slava.baklagin@mail.ru

Received on January 28, 2023 / Approved after reviewing on May 3, 2023 / Accepted on May 6, 2023

Abstract. The purpose of this study is to classify the territories of the forest fund of the Republic of Karelia and Murmansk region at the level of central forestries on the basis of multifactorial assessment of timber resources, natural and production conditions, and road infrastructure. Forest exploitation zoning was carried out taking into account 20 variables. For this purpose, factor and hierarchical cluster analysis, k-means method and discriminant analysis were successively applied. Based on statistical methods, all central forestries were distributed into 9 clusters: 4 large clusters (No. 2, 3, 8, 9), including several forestries, and 5 (No. 1, 4–7), each formed by one forestry. Forestries of cluster No. 2 had large annual allowable cut (AAC), significant average forest reserve per hectare and hardwood reserve. Forestries of cluster No. 3 were characterized by small AAC and forest reserves per hectare. Cluster No. 8 forestries were characterized by average AAC and forest stock per hectare, high proportion of forests in stagnant moisture conditions. Forestries of cluster No. 9 were intermediate in their characteristics between the forestries of clusters No. 2 and No. 8. The forestry of cluster No. 1 is close to the forestry of cluster No. 2 in its characteristics, but its forests are more productive. Forestries of small clusters No. 4, 6, 7 have the highest forest stock per hectare. Differences in some variables did not allow them to be combined into one cluster. The forestry of cluster No. 5 is similar in terms of natural and production conditions to the forestry of cluster No. 3 but had a small estimated harvesting area for the coniferous component. The results of the study can be considered when solving the issues of organization and development of forestry and forest industry complex in the Republic of Karelia and Murmansk region.

Keywords: zoning, factor analysis, cluster analysis, k-means method, discriminant analysis, logging, forest management

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00143, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00143/>.

For citation: Budnik P.V., Baklagin V.N., Galaktionov O.N. Forest Exploitation Zoning of Forest Subarctic Territories. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 114–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-114-135>

Введение

На Российскую Федерацию приходится 20 % мировых лесов. Общий запас древесины лесных насаждений, по данным Единой межведомственной информационно-статистической системы, на 2022 г. составляет 82,5 млрд м³ при общей площади 1,19 млрд га. Колоссальные запасы древесины территориально распределены по значительной площади, а лесные территории имеют большое разнообразие природно-производственных условий. Поэтому эффективное стратегическое государственное управление в сфере лесного хозяйства и экономики является сложной комплексной задачей, от решения которой зависит эффективность использования лесных ресурсов и развитие экономик субъектов Российской Федерации.

Неоднородность характеристик лесных территорий обуславливает необходимость в отдельных частях лесного фонда предпринимать особые меры по организации лесного хозяйства и лесопользованию. Основой для организации региональных систем управления лесными ресурсами в этом случае может служить комплексное лесоэксплуатационное районирование [3]. Под районированием мы понимаем процесс деления территорий на отдельные районы, каждый из которых объединяет лесные площади со схожими показателями. Деление лесных территорий на однородные группы в лесоэксплуатационном отношении позволяет рационально проектировать мероприятия, направленные на экономически эффективное освоение лесных ресурсов, включая заготовку древесины и ее переработку, и обеспечить сохранение биологического разнообразия, самовоспроизводство и продуктивность лесных массивов.

При тематическом районировании, в частности почвенном, климатическом, лесорастительном, не нужно обоснования результатов статистическими методами, т. к. классификация основана на вариации одного параметра, реже двух. Однако районирование, базирующееся на множестве параметров, требует иного подхода. В настоящее время для многомерной классификации лесных территорий широко применяются статистические методы, например факторный и кластерный анализ [25, 27, 32, 41]. Это позволяет получать более достоверные данные при районировании территорий. В России также проведены исследования, направленные на применение статистических методов для решения задачи классификации лесных территорий [1, 34].

Одной из проблем при районировании является выбор параметров, на основе которых будут сравниваться лесные территории. При разработке ме-

роприятий, направленных на экономически эффективное освоение лесных ресурсов, необходимо учитывать факторы, влияющие на лесозаготовки. Исследователями отмечается [10, 38], что эффективность лесозаготовительных кампаний в России определяется рядом факторов: объемом доступной древесины, производственными мощностями и спросом на продукцию. Объем доступной древесины зависит от величины расчетной лесосеки, которая устанавливается для эксплуатационных и защитных лесов по лиственному и хвойному компонентам. Транспортные затраты составляют значительную долю операционных затрат на заготовку древесины [28, 29]. Поэтому часть древесины может быть экономически недоступна для освоения.

Нами не учитывался спрос на продукцию. Однако в связи с особенностями породного состава леса рассматривалось предложение объекта спроса, т. е. продукция, которая может быть произведена из имеющейся древесины для целей ее комплексной переработки. Также принят во внимание фактор восполнения запасов древесины в будущем периоде, выраженный в виде доли площади приспевающих насаждений от общей лесопокрытой площади региона исследования.

В контексте данного исследования в фокусе внимания были природно-производственные условия, которые влияют на производительность машин и механизмов. В частности, хорошо известно влияние среднего запаса древесины на гектаре и размера деревьев на производительность харвестера [20, 23] и форвардера [21, 26, 33]. Обычно отмечается увеличение производительности с возрастанием среднего запаса древесины на гектаре и размеров отдельных деревьев. Эффективность лесозаготовительных машин, в особенности транспортных, зависит от почвенно-грунтовых условий [9, 33]: на переувлажненных почвах производительность снижается. Кроме того, работа техники на переувлажненных почвах вызывает разрушение почвенного покрова [6, 22]. Породный состав также может существенно воздействовать на производительность машин и оборудования [14, 24, 31]. Работа лесозаготовительных машин более продуктивна в хвойных насаждениях, чем в лиственных. Породный состав определяет хозяйственную ценность древостоя. Существенно на производительность лесозаготовительных машин влияет вид рубки [7, 40]. При сплошных рубках производительность харвестера и форвардера выше, чем при выборочных.

Геополитическое значение Арктической зоны в последние десятилетия неуклонно возрастает [11]. Это приводит к повышению внимания арктических государств к развитию своих северных территорий и решению проблем экологического управления [13]. Выбор Республики Карелии и Мурманской области в качестве региона исследования обусловливается тем, что данные субъекты Российской Федерации являются важными стратегическими приграничными районами Арктической зоны. Оба субъекта имеют лесопромышленный комплекс, включающий лесное хозяйство, лесную и деревообрабатывающую промышленность.

Цель – кластеризация лесных территорий района исследования на уровне центральных лесничеств на основе полифакториальной оценки ресурсов древесины, природно-производственных условий и инфраструктуры, обеспечивающей освоение и охрану лесов.

Объекты и методы исследования

Мурманская область и Республика Карелия находятся на северо-западе европейской части России на границе с Финляндией и входят в Арктическую зону Российской Федерации [8]. Общий запас древесины в регионе исследования оценивается в 1409,57 млн м³. Большая часть приходится на Республику Карелию – 1071,73 млн м³, в Мурманской области – 237,84 млн м³. Площадь лесных земель, покрытых лесной растительностью, составляет 15 034,1 тыс. га: 9607,7 тыс. га для Республики Карелии и 5426,4 тыс. га для Мурманской области. Объем заготовки древесины в Республике Карелии, по данным официальной статистики, в 2021 г. составил 8099,3 тыс. м³, а в Мурманской области – 96,97 тыс. м³.

В направлении с юга на север в регионе исследования климатические и почвенно-гидрологические условия постепенно изменяются в сторону, неблагоприятную для роста и развития продуктивных лесов. Наблюдается снижение температуры воздуха, мощности и аэрации почв. Это ограничивает распространение продуктивных лесов в северном направлении. Леса составлены такими породами, как сосна, ель, береза и осина. Преобладают хвойные породы. На юге региона исследования в основном произрастают еловые леса, а в центральной и северной части – сосновые. На севере, на границе перехода тайги в тундру, простираются лесотундровые березовые редколесья.

Лесопользование предполагает межевание лесных земель на центральные лесничества. Республика Карелия разделена на 17 центральных лесничеств, а Мурманская область – на 10.

Для целей настоящего исследования были собраны данные по 27 центральным лесничествам, относящиеся к качественным и количественным характеристикам ресурсов древесины, их инфраструктурной доступности и природно-производственным условиям. Набор данных включал 20 переменных: 4 из них описывали количественные характеристики ресурсов древесины; 9 – качественные; 3 – дорожную сеть; 4 – природно-производственные условия (табл. 1).

Таблица 1

Описательные статистики переменных, характеризующих центральные лесничества Республики Карелии и Мурманской области
Descriptive statistics of variables characterizing central forestries in the Republic of Karelia and Murmansk region

Обозначение переменной	Описание	Среднее	Стандартное отклонение
R_f	Расчетная лесосека при всех видах рубок по хвойному компоненту (ликвидный), тыс. м ³	388,61	358,88
R_d	Расчетная лесосека при всех видах рубок по мягколиственному компоненту (ликвидный), тыс. м ³	78,59	129,26
Rcf_f	Расчетная лесосека для осуществления сплошных рубок спелых и перестойных лесных насаждений по хвойному компоненту в эксплуатационных лесах (ликвидная), тыс. м ³	235,41	267,39

Окончание табл. 1

Обозначение переменной	Описание	Среднее	Стандартное отклонение
Rcf_d	Расчетная лесосека для осуществления сплошных рубок спелых и перестойных лесных насаждений по мягколиственному компоненту в эксплуатационных лесах (ликвидная), тыс. м ³	57,07	100,88
Vp_4_5	Средний запас эксплуатационного фонда по сосне IV–V бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	110	52
Vp_1_3	Средний запас эксплуатационного фонда по сосне I–III бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	141	120
Vs_4_5	Средний запас эксплуатационного фонда по ели IV–V бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	115	69
Vs_1_3	Средний запас эксплуатационного фонда по ели I–III бонитета (сплошные рубки), м ³ /га	118	126
Vb	Средний запас эксплуатационного фонда по березе (сплошные рубки), м ³ /га	111	65
Va	Средний запас эксплуатационного фонда по осине (сплошные рубки), м ³ /га	81	102
MF_f	Доля площади приспевающих хвойных древостоев (сплошные рубки) от общей площади лесничества, отведенной под сплошные рубки, %	1,6	1,8
MF_d	Доля площади приспевающих мягколиственных древостоев (сплошные рубки) от общей площади лесничества, отведенной под сплошные рубки, %	0,6	1,1
V_g	Расчетный средний запас леса (отношение запаса древесины к лесопокрытой площади), м ³ /га	92,70	49,99
P	Плотность дорог, км/тыс. га	2,6	1,5
W_h	Доля автомобильных дорог с твердым покрытием по протяженности, %	28	23
W_s	Доля автомобильных грунтовых дорог круглогодичного действия по протяженности, %	55	27
III	Доля площади лесничества с 3-м классом природной пожарной опасности, %	18,9	9,0
IV	Доля площади лесничества с 4-м классом природной пожарной опасности, %	24,6	12,8
V	Доля площади лесничества с 5-м классом природной пожарной опасности, %	28,3	15,1
AUF	Доля земель, покрытых лесной растительностью (лесистость), %	66	15

В качестве переменных, характеризующих природно-производственные условия, в исследовании предлагается использовать косвенную оценку, основанную на классификации лесных территорий по классам природной пожарной опасности. В Российской Федерации выделяется 5 классов. В анализ были включены доли лесных территорий центральных лесничеств, приходящихся на 3–5-й классы природной пожарной опасности.

1- и 2-й классы природной пожарной опасности составляют территории сосняков-брусничников, хвойных молодняков, сплошных рубок, а также расстроенных, отмирающих и сильно поврежденных древостоев. К 3- и 4-му классам обычно относят территории, приходящиеся на сосняки-кисличники и черничники, ельники-брусничники и кисличники. В лесах 4-го класса условия более влажные, чем в лесах 3-го класса. В целом эти территории характеризуются сравнительно более сухими почвами и преобладанием хвойных пород. К 5-му классу относятся леса с превалированием лиственных пород (березняки, осинники), а также ельники с относительно высокой степенью влажности. Это обуславливает специфику ведения лесозаготовительных работ, в частности необходимость соблюдения периода заготовки, выбора способа разработки лесосеки и наличие мер, связанных с минимизацией воздействия на почвенный покров леса [15, 42]. Для интерпретации природно-производственных условий мы использовали классификацию типов леса В.Н. Сукачева [2]. Классификация рассматривает тип леса как тип лесного биогеоценоза и соответствующий этому сообществу участок земной поверхности с присущими ему эдапотом и климатотом. Сопоставляя классификацию типов леса В.Н. Сукачева и описание классов природной пожарной опасности, мы проинтерпретировали природно-производственные условия.

Источниками данных стали документы лесного планирования субъектов (лесные планы) и лесохозяйственные регламенты центральных лесничеств, являющиеся основой для использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов.

Для кластеризации лесных территорий на уровне центральных лесничеств последовательно применялись факторный [36], кластерный [16] и дискриминантный [12] анализ. Анализ данных проведен в MS Excel и программе SPSS Statistics.

Цели применения факторного анализа – устранение мультиколлинеарности и сокращение числа переменных для кластерного анализа. В результате рассчитаны собственные значения факторов, далее использованные в кластерном анализе. Извлечение факторов осуществлялось методом главных осей. Количество факторов, характеризующих объясненную совокупную дисперсию данных, определялось по критерию Кайзера [17]. Для получения простой структуры факторов применен метод Варимакс [18]. Верность факторного анализа как метода работы с конкретными данными контролировалась по критерию адекватности выборки Кайзера–Мейера–Олкина (КМО) [19] и критерию сферичности Бартлетта [5].

Кластерный анализ включал 3 этапа. На 1-м этапе для определения оптимального числа кластеров использовался иерархический кластерный анализ [16]. Были применены несколько методов кластеризации и мер сходства для анализа

возможных различий в классификации и выявления территорий центральных лесничеств, которые однозначно не классифицируются. Методы кластеризации и меры сходства, используемые ими, следующие: для методов межгрупповой связи (средней связи) и наиболее удаленных соседей (полной связи) мерами сходства являются евклидово расстояние, квадрат евклидова расстояния, расстояние Манхэттена, расстояние Чебышева; для метода Уорда мера сходства – квадрат евклидова расстояния. Необходимое количество кластеров определялось по изменению меры сходства между кластерами в процессе последовательного объединения лесных территорий в кластеры. Сравнительный анализ состава кластеров проводился по дендрограммам. Для однозначной классификации центральных лесничеств, которые объединяются в различные кластеры при использовании разных методов кластеризации, учитывалась дополнительная информация. В частности, использовались сведения топографических, почвенных карт и другие данные из лесных планов и лесохозяйственных регламентов центральных лесничеств. На 2-м этапе для определения состава кластеров применен метод итеративной кластеризации k-средних. Данный метод может давать более точную классификацию [4]. На 3-м этапе результаты итеративной кластеризации сравнивались с результатами иерархического кластерного анализа и принималось окончательное решение по составу кластеров с учетом дополнительной информации, собранной на этапе иерархического кластерного анализа.

Для подтверждения достоверности результатов кластеризации лесничеств выполнен дискриминантный анализ. Совпадение результатов дискриминантного анализа с результатами кластерного анализа подтверждало правильность полученной классификации лесничеств при условии достоверности результатов дискриминантного анализа. В свою очередь, достоверность результатов дискриминантного анализа обосновывалась расчетом следующих критериев:

оценка взаимосвязи между расчетными значениями дискриминантных функций и принадлежности лесничества к кластеру была основана на расчете коэффициента канонической корреляции;

различия средних значений дискриминантных функций, т. е. значимость различия между кластерами, оценивались при помощи лямбды Уилкса;

статистическая значимость дискриминантных функций подтверждалась критерием Пирсона.

Результаты исследования и их обсуждение

Величина КМО составила 0,708, что позволило сделать вывод о возможности применения факторного анализа к данным. Значение КМО менее 0,5 неприемлемо [19]. Критерий сферичности Бартлетта показал значимое отличие от нулевой корреляции между переменными ($p < 0,001$). Общность переменных находилась в интервале от 0,560 до 0,941. Поэтому все переменные были оставлены для анализа. В соответствии с критерием Кайзера выделено 5 факторов, объясняющих 81,4 % общей дисперсии переменных. Описание выделенных факторов приведено в табл. 2.

Таблица 2

Интерпретация извлеченных факторов
Extracted factors interpretation

Обозначение фактора	Название	Доля общей дисперсии переменных, объясненная фактором, %	Переменные, наиболее нагружающие фактор	Нагрузка на фактор
F1	Ценность эксплуатационного фонда	43,7	Vp_4_5	0,910
			Vp_1_3	0,909
			Vs_4_5	0,878
			Vb	0,875
			Vs_1_3	0,745
			MF_f	0,613
F2	Соответствие территории природным условиям произрастания лиственных пород и уровень расчетной лесосеки по мягколиственному компоненту	15,6	IV	0,810
			R_d	0,766
			Rcf_d	0,755
			MF_d	0,669
F3	Благоприятность природно-производственных условий	10,0	AUF	0,871
			III	0,778
			P	0,730
			V_g	0,714
F4	Расчетная лесосека по хвойному компоненту	7,5	V	-0,641
			R_f	0,778
F5	Качество дорожной сети	4,6	Rcf_f	0,764
			W_h	0,853
			W_s	-0,831

Оптимальное число кластеров по результатам иерархического кластерного анализа составило 9 (рис. 1).

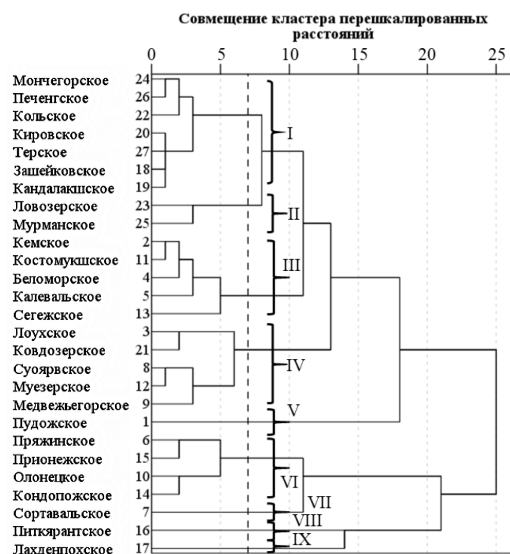


Рис. 1. Дендрограмма иерархического кластерного анализа. Метод кластеризации – метод наиболее удаленного соседа, мера сходства – квадрат евклидова расстояния

Fig. 1. Dendrogram of hierarchical cluster analysis. Clustering method – the method of the most distant neighbor, similarity measure – the square of Euclidean distance

Методом k-средних центральные лесничества региона исследования окончательно были разделены на 9 кластеров (рис. 2).

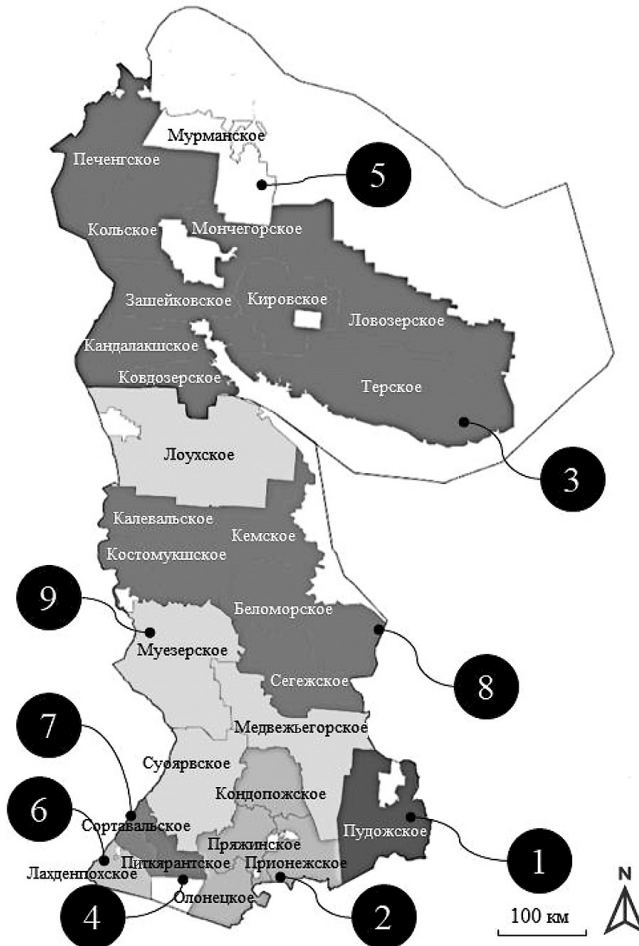


Рис. 2. Карта-схема лесоэксплуатационных районов Республики Карелии и Мурманской области (N – север)

Fig. 2. Map-chart of forest exploitation areas of the Republic of Karelia and Murmansk region (N – north)

Кластеры, состоящие из нескольких лесничеств:

Кластер № 2. Включает 4 центральных лесничества, расположенных в южной части Республики Карелии. Территория характеризуется высокой степенью лесистости (табл. 3). Объем расчетной лесосеки выше среднего по региону исследования. При этом в среднем по кластеру более половины расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки. Это говорит о значительном текущем потенциале лесозаготовок. Кластер имеет самую большую в регионе исследования долю приспевающих эксплуатационных лесов, отведенных под сплошные рубки. Однако эта доля незначительна, что свидетельствует о проблеме восполнения спелых и перестойных эксплуатационных лесов при их вырубке.

Таблица 3

Среднее значение некоторых переменных для кластеров
Average value of some variables for clusters

Номер кластера	AUF	R_f	R_d	Rcf_f / R_f, %	Rcf_d / R_d, %	MF_f	MF_d
1	80	1222,1	537,4	67	76	3,6	2,4
2	81	526,3	232,4	50	67	4,2	2,1
3	59	64,3	5,1	69	60	0,4	0,2
4	90	360,2	51,5	0	0	0	0
5	53	11,1	0	0	0	0	0
6	86	399,6	53,1	3	16	0,3	0,2
7	85	403,1	60,9	9	20	0,4	0,1
8	54	342,7	14,1	66	79	1,4	0,1
9	64	924,8	93,2	74	87	2,7	0,3
<i>Среднее по региону</i>	66	388,6	78,6	38	45	1,6	0,6

В лесах центральных лесничеств, составляющих кластер, представлены все основные породы: сосна, ель, береза и осина. При этом средний запас леса по лиственным породам – один из самых высоких в регионе исследования (табл. 4).

Таблица 4

Средний запас (м³/га) леса по породам для кластеров
Average forest stock (m³/ha) by species for clusters

Номер кластера	Vp_4_5	Vp_1_3	Vs_4_5	Vs_1_3	Vb	Va	V_g
1	151	275	179	260	194	258	132
2	140	240	192	245	187	224	144
3	68	0	65	0	57	0	44
4	0	0	0	0	0	0	172
5	0	0	0	0	0	0	37
6	141	223	0	254	174	169	168
7	175	278	246	263	172	0	205
8	149	222	141	133	115	72	89
9	145	237	154	194	152	123	93
<i>Среднее по региону</i>	110	141	115	118	111	81	93

Центральные лесничества кластера имеют средний расчетный запас леса выше среднего по региону исследования. Учитывая уровень лесистости, а также средние запасы леса на гектаре по породам, можно заключить, что леса расположены сравнительно равномерно по территории лесничества и их продуктивность относительно высокая.

В кластере представлены леса со значительным содержанием лиственных пород (березы, осины), ельники долгомошные, формирующиеся в услови-

ях сырых сильноподзолистых тяжелых супесей или суглино-супесей, а также более сухие сосняки-кисличники и черничники, ельники-брусничники и кисличники, где почвы влажные, средне- и сильноподзолистые, супесчаные или суглино-супеси. Распределение площади центральных лесничеств кластера по классам природной пожарной опасности приведено в табл. 5.

Таблица 5

**Распределение площади центральных лесничеств
кластеров по классам природной пожарной опасности, %**
**Distribution of the area of central forestry by natural fire danger classes,
on average for clusters, %**

Номер кластера	Класс опасности			
	1- и 2-й	3-й	4-й	5-й
1	20	15	41	25
2	21	22	36	21
3	31	15	30	24
4	35	35	20	10
5	13	16	38	33
6	32	31	27	11
7	19	41	27	13
8	26	16	10	46
9	36	16	12	36
<i>Среднее по региону</i>	28	19	25	28

Развитость дорожной инфраструктуры оценивается выше среднего по региону исследования (табл. 6), что тем не менее значительно меньше необходимого (10–15 км/тыс. га). Кроме того, в кластере преобладают грунтовые дороги круглогодичного действия.

Таблица 6

Средние показатели дорожной инфраструктуры для кластеров
Road infrastructure indicators for clusters

Номер кластера	P	W _h	W _s
1	3,0	46	54
2	3,2	29	68
3	1,9	15	60
4	7,4	26	74
5	0,8	80	18
6	5,6	100	0
7	2,6	14	71
8	2,1	32	38
9	2,8	24	69
<i>Среднее по региону</i>	2,6	28	55

Из приведенных данных следует, что характерными для лесничеств кластера являются большие расчетная лесосека, запас леса на гектаре, запас лиственных пород и распространенность в лесах ели.

Кластер № 3. Включает все центральные лесничества Мурманской области, кроме Мурманского (всего 9 лесничеств). Территория лесничеств кластера характеризуется сравнительно низкой степенью лесистости (табл. 3). Наибольшая лесистость наблюдается в южных центральных лесничествах на границе с Республикой Карелией, а также в лесничествах на границе с Финляндией и Норвегией. Здесь лесистость доходит до 70 %. Расчетная лесосека в среднем по кластеру – одна из самых небольших среди лесничеств региона исследования. Более половины расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки (табл. 3). Проблема восполнения приспевающих эксплуатационных лесов в лесничествах кластера стоит еще острее, чем в лесничествах кластера № 2.

Лесной фонд характеризуется IV и V классами бонитета. Леса представлены преимущественно хвойными породами (сосна и ель) с примесью березы. Лесничества имеют самые низкие запасы леса на гектаре (табл. 4). Небольшой расчетный запас леса на гектаре в совокупности с уровнем лесистости позволяет дать заключение о редкостойности леса и значительной доле не покрытых лесной растительностью земель. Почвы – сырые и влажные (табл. 5). Однако встречаются и более сухие условия, что объясняется наличием пересеченного рельефа.

Дорожная инфраструктура развита слабо (табл. 6) и расположена неравномерно. Наибольшую плотность она имеет в западной и южной частях кластера, где превышает среднее значение по региону, показатель падает в северо-восточном направлении. Преобладают грунтовые дороги круглогодичного действия.

Таким образом, характерными для лесничеств кластера являются относительно небольшие лесистость, расчетная лесосека и невысокие средний запас леса на гектаре, запас лиственных пород, которые представлены исключительно березой. Дорожная инфраструктура в целом имеет крайне низкую плотность.

Кластер № 8. Составлен 5 центральными лесничествами, расположенными в северной части Республики Карелии. Лесистость в среднем по кластеру ниже средней по региону исследования (табл. 3). Объем расчетной лесосеки при всех видах рубок по хвойному компоненту в среднем по кластеру близок к среднему для региона исследования, но значительно меньше по лиственному компоненту. Более половины расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки. В целом по кластеру доля приспевающих лесов незначительна.

В лесах кластера представлены сосна, ель, береза и осина. Запас леса на гектаре по лиственным породам в эксплуатационных спелых и перестойных лесах в среднем по кластеру выше среднего по региону исследования (табл. 4). Учитывая средний расчетный запас леса на гектаре и уровень лесистости, можно сделать заключение о том, что леса расположены неравномерно по площади лесничеств, включенных в кластер. Особенностью лесничеств кластера является большая доля лесов с сырыми сильноподзолистыми тяжелыми супесями или суглино-супесями, характеризующихся застойным увлажнением и, как правило, представленными сосняками (табл. 5).

Плотность дорог в среднем по кластеру ниже средней по региону исследования (табл. 6). Достаточно широко распространены зимние дороги, однако они сконцентрированы в северных лесничествах (Калевальское и Кемское) и практически отсутствуют в южных. Дороги с твердым покрытием имеют наибольшую протяженность в южных лесничествах (Сегежское и Беломорское) в сравнении с грунтовыми дорогами.

Итак, характерными для лесничеств кластера являются относительно небольшая лесистость, близкие к средним по региону исследования расчетная лесосека и запас леса на гектаре, большая доля лесов, расположенных в условиях застойного увлажнения, и распространенность сосны, средний запас леса на гектаре для осины незначительный. Лесничествам кластера свойственно локальное разнообразие типов дорог.

Кластер № 9. В него входят 4 центральных лесничества, преимущественно расположенных в центральной части Республики Карелии. Лесистость в среднем по кластеру находится на уровне средней по региону (табл. 3). Лесничества кластера характеризуются большой средней расчетной лесосекой по хвойному компоненту, в то время как по лиственному – на уровне среднего. Доля лесов, отведенных под сплошные рубки, самая высокая в регионе исследования.

В лесах кластера представлены все лесообразующие породы: сосна, ель, береза и осина. Лесничествам кластера свойствен более высокий средний запас леса на гектаре в сравнении с лесничествами кластера № 8, но меньший, чем у лесничеств кластера № 2 (табл. 4). Леса расположены неравномерно по территории кластера. Наиболее продуктивные находятся на юге (Суоярвское и Медвежьегорское центральные лесничества). Значительна доля лесов с застойным увлажнением, представлены, как правило, сосновые леса в сочетании с еловыми лесами и болотами (табл. 5). Леса, произрастающие на более сухой местности, концентрируются ближе к границе с Финляндией.

Плотность дорог в среднем по кластеру немного выше средней по региону (табл. 6). Наибольшую плотность дороги имеют в Суоярвском и Муезерском центральных лесничествах, а наименьшую – в самом северном Лоухском. Преобладают грунтовые дороги.

В целом характерным для лесов кластера является большой средний запас леса на гектаре, чем в лесничествах кластера № 8, но меньший, чем в лесничествах кластера № 2. Широко представлена ель. Ее распространение меньше по сравнению с кластером № 2, но больше в сравнении с кластером № 8. Территория лесничеств кластера характеризуется значительной долей лесов с застойным увлажнением. Эта доля ощутимо больше, чем в кластере № 2, но меньше, чем в кластере № 8. Аналогичная ситуация наблюдается с уровнем лесистости. По соотношению грунтовых дорог и дорог с твердым покрытием лесничества кластера схожи с лесничествами кластера № 2, но их плотность ощутимо меньше. Таким образом, характеристики лесничеств кластера занимают промежуточное, или переходное, положение между характеристиками лесничеств кластеров № 2 и 8.

Кластеры, сформированные одним лесничеством:

Кластер № 1. В кластер входит одно центральное лесничество – Пудожское, расположенное в юго-восточной части Республики Карелии на границе с Архангельской и Вологодской областями. Лесничество имеет значительную

лесистость, как и лесничества соседнего кластера № 2, и сравнительно большую расчетную лесосеку (табл. 1). Более 1/2 расчетной лесосеки отведено под сплошные рубки. Лесничество имеет те же проблемы, связанные с возмещением спелых и перестойных лесов, что и лесничества рассмотренных кластеров.

В лесах представлены все основные лесообразующие породы: сосна, ель, береза и осина. Средний запас леса на гектаре по лиственному компоненту самый значительный по региону исследования (табл. 4). Большие значения имеют только лесничества кластера № 7 (не учитывается лесничество кластера № 4, для которого нет данных о среднем запасе леса на гектаре по породам из-за отсутствия сплошных рубок). Расчетный средний запас леса на гектаре вместе с уровнем лесистости свидетельствуют о равномерности распределения лесов по площади. Природно-производственные условия характеризуются наличием сырых и влажных почв (табл. 5). Леса преимущественно еловые зеленомошные в сочетании с более влажными еловыми заболоченными. В лесах обычна примесь осины и березы.

Плотность дорог находится примерно на уровне лесничеств соседнего кластера № 2 (табл. 6). Однако соотношение грунтовых дорог и дорог с твердым покрытием иное. Доля автомобильных дорог с твердым покрытием является одной из самых высоких в регионе исследования, уступая лишь лесничествам кластеров № 5 и 6.

Таким образом, лесничество кластера наиболее схоже по природно-производственным условиям с лесничествами кластера № 2. Это подтверждается одинаковым уровнем лесистости, близким соотношением категорий лесов по природной пожарной опасности. Однако выделение данного лесничества в отдельный кластер связано с тем, что его леса в целом несколько продуктивнее, о чем свидетельствует средний запас леса на гектаре по породам. При этом лиственные породы в лесах чувствуют себя лучше: средний запас леса по березе и осине – самый большой в регионе исследования. Хотя в кластере плотность дорог незначительно меньше, чем в кластере № 2, их качество лучше (доля дорог с твердым покрытием выше).

Кластер № 4. В кластер включено Питкярантское центральное лесничество, расположенное в южной части Республики Карелии на северном берегу Ладожского озера. Соседний кластер – № 2. Лесничество кластера имеет самую большую лесистость по региону исследования (табл. 3). Расчетная лесосека немного меньше средней по региону. Меньшие значения имеют только лесничества самых северных кластеров – № 3 и 5. Особенностью данного кластера является то, что в лесах не допускаются сплошные рубки. Леса характеризуются относительно сухими почвами и представлены сосняками с примесью ели и березы, а также ельниками (табл. 5). Леса распределены равномерно по территории лесничества. Для территории кластера выявлена самая большая плотность дорог – 7,4 км/тыс. га (табл. 6). Преобладают грунтовые дороги.

Выделение Питкярантского центрального лесничества в отдельный кластер обусловлено, во-первых, отсутствием лесов, отведенных под сплошную рубку, во-вторых, более высокой плотностью дорог относительно средней по региону исследования. Кроме того, средний запас леса на гектаре больше, чем в лесничествах соседних крупных кластеров № 2 и 9. При этом лесничество

кластера характеризуется более сухими условиями произрастания лесов, т. к. доля площади с 3-м классом природной пожарной опасности – одна из самых больших и уступает только лесничеству, выделенному в кластер № 7.

Кластер № 5. Является самым северным в исследуемом регионе. Образован Мурманским центральным лесничеством, находящимся в северной части Кольского полуострова на границе с тундрой. Уровень лесистости ниже среднего (табл. 3). Средний расчетный запас леса на гектаре совпадает со средними показателями кластера № 3. Лесничество характеризуется самой маленькой расчетной лесосекой. Расчетная лесосека по лиственному компоненту отсутствует. Это является отличием рассматриваемого кластера от кластера № 3.

В лесничестве кластера не предусматривается отведение лесов под сплошные рубки, что также отличает его от лесничеств кластера № 3. Однако необходимо отметить, что в одном из лесничеств кластера № 3 (Ловозерское центральное лесничество) также не планируются сплошные рубки. Ловозерское лесничество некоторыми методами кластеризации объединялось с Мурманским лесничеством в один кластер. Большая доля территории кластера относится к местностям с застойным увлажнением и заболоченностью (табл. 5). Леса в основном сформированы сосной и елью. На границе с тундрой встречается береза.

Лесничество кластера имеет самую низкую плотность дорог (табл. 6). Следует отметить, что в кластере № 3 некоторые центральные лесничества отличаются еще меньшей плотностью дорог, но в среднем по этому кластеру она составляет 1,9 км/тыс. га. Преобладают дороги с твердым покрытием, что резко отличает кластер № 5 от кластера № 3.

В целом лесничество кластера в значительной мере схоже с лесничествами кластера № 3. Отличительными характеристиками кластера № 5 являются небольшая расчетная лесосека по хвойному компоненту и отсутствие расчетной лесосеки по лиственным породам, а также преобладание автомобильных дорог с твердым покрытием.

Кластер № 6. Сформирован Лахденпохским центральным лесничеством, занимающим территорию в южной части Республики Карелии на северном берегу Ладожского озера. Лесничество кластера имеет большую лесистость (табл. 3), что позволяет говорить о его сходстве с лесничествами других кластеров южной части Республики Карелии (№ 1, 2, 4, 7). Расчетная лесосека находится примерно на уровне других лесничеств соседних малых кластеров (№ 4 и 7). Характеризуется незначительной долей хвойных лесов, отведенных под сплошные рубки. Как и в лесничествах кластера № 4 и 7, леса произрастают на сравнительно сухих почвах и представлены еловыми древостоями, сосняками и сосновыми древостоями, местами с примесью березы (табл. 5).

Лесничество кластера имеет относительно высокую плотность дорог (табл. 6). Это приближает его к лесничеству кластера № 4. Однако практически все дороги кластера – с твердым покрытием, что не похоже на лесничества кластеров № 4 и 7.

Кластер № 7. Сформирован Сортавальским центральным лесничеством, расположенным в южной части Республики Карелии на северном берегу Ладожского озера, и примыкает с запада к кластеру № 4, с юго-запада граничит с кластером № 6. Лесистость значительно выше средней и находится примерно на том же уровне, что и в лесничестве кластера № 4 (табл. 3). Объем расчетной

лесосеки приблизительно на уровне среднего по региону исследования. Доля хвойных лесов, отведенных под сплошные рубки, незначительна, что сближает кластер с кластерами № 4 и 6.

В лесах кластера представлены 3 из основных лесообразующих пород: сосна, ель и береза. Леса характеризуются самым высоким средним запасом леса на гектаре в регионе исследования по хвойному компоненту (табл. 4). Почвы относительно сухие, как и в кластерах № 4 и 6. Представлены еловые и сосновые древостои, местами с примесью березы (табл. 5).

Плотность дорог в среднем по кластеру на уровне среднего значения по региону (табл. 6). Преобладают грунтовые дороги.

Лесничество кластера по многим характеристикам схоже с лесничеством кластера № 4, но в то же время имеет ряд особенностей, не позволивших объединить эти кластеры в одну группу. Плотность дорог в кластере № 7 находится на среднем уровне по региону исследования, что в 2 раза меньше, чем в кластере № 4. Запас леса на гектаре также заметно превосходит показатели лесничества кластера № 4. Расчетная лесосека сопоставима в лесничествах сравниваемых кластеров, но в лесничестве кластера № 7 есть леса, отведенные под сплошную рубку. В целом лесничества малых кластеров № 4, 6 и 7 во многом схожи, но отличия по некоторым переменным, выбранным для исследования, не позволили объединить данные кластеры.

Проверка результатов

Достоверность результатов кластерного анализа подтверждена результатами дискриминантного анализа. Предсказания о принадлежности центрального лесничества к классу с использованием дискриминантных функций в 100 % совпадало с данными кластерного анализа. Было получено 5 линейных дискриминантных функций, значение канонической корреляции которых находилось в диапазоне 0,851–0,973. Это говорит о сильной связи между расчетными значениями дискриминантной функции и принадлежности лесничества к группе, определенной по результатам кластерного анализа. Тест на различие между собой средних значений дискриминантных функций в кластерах, проведенный с помощью критерия лямбды Уилкса, показал значимый результат: лямбда Уилкса приближается к 0; $p < 0,001$ (табл. 7).

Таблица 7

Результаты расчета значений критериев достоверности дискриминантных функций

Results of calculating the values of reliability criteria of discriminant functions

Критерий для функций	Лямбда Уилкса	Критерий Пирсона		Число степеней свободы	Значимость
		расчетный	табличный (при уровне значимости 0,01)		
От 1 до 5	0	177,920	22,164	40	<0,001
От 2 до 5	0,002	122,004	13,565	28	<0,001
От 3 до 5	0,012	83,437	7,015	18	<0,001
От 4 до 5	0,067	51,408	2,558	10	<0,001
5	0,276	24,451	0,297	4	<0,001

Расчетные значения критерия Пирсона превышали теоретические на 1%-м уровне (табл. 7), что подтверждало достоверность различий между функциями. Таким образом, каноническая корреляция, критерий лямбды Уилкса, р-значения и критерий Пирсона подтвердили достоверность результатов кластерного анализа.

Исследование основано на применении нескольких статистических методов с целью получения научно обоснованных и статистически достоверных результатов. Авторами статьи не были выявлены работы, базирующиеся на использовании схожей методики для данного региона. Однако применение факторного, кластерного и дискриминантного анализа в решении задач классификации лесных территорий из литературы известно [30, 35]. В целом результаты, представленные в статье, хорошо согласуются с другими исследованиями, целью которых являлся систематический анализ лесной отрасли России [37, 43]. Отметим, что полученные результаты соотносимы с нашими предшествующими исследованиями [39], в которых мы классифицировали по природно-производственным условиям лесные территории на уровне субъектов России.

Вместе с тем необходимо учитывать ограниченность результатов исследования. Во-первых, предложенная классификация основана на 20 переменных, которые не могут в полной мере охарактеризовать центральные лесничества. Второй проблемой является уровень, на котором осуществлена классификация. Очевидно, что средние значения переменных в целом по лесничеству не могут отразить всю вариативность условий в лесах. Более качественный результат дала бы классификация на уровне участков лесничеств, а наилучший – на уровне лесных кварталов или выделов. Однако здесь остро встает вопрос доступности и систематизированности данных. Учитывая приведенные недостатки, исследование не претендует на исчерпывающий характер, а является попыткой проанализировать состояние некоторых аспектов лесной отрасли и на основе научно обоснованного подхода дать классификацию территорий центральных лесничеств.

Заключение

Статья закладывает основу для более глубокого изучения проблемы эффективного использования лесных ресурсов и развития экономик приграничных арктических районов России. Анализ характеристик 27 центральных лесничеств региона исследования на основе статистических методов показал, что выделяются 4 крупных кластера: № 2, 3, 8, 9, объединяющих от 4 до 9 центральных лесничеств, однородных по комплексу ресурсно-эксплуатационных показателей; и 5 кластеров – № 1, 4–7, – каждый из которых представлен одним центральным лесничеством.

Лесничества кластера № 2 имеют большие расчетную лесосеку, средний запас леса на гектаре, запас лиственных пород и распространенность в лесах ели. Лесничества кластера № 3 характеризуются невысокими лесистостью, расчетной лесосекой, небольшими средним запасом леса на гектаре и запасом лиственных пород. Для лесничеств кластера № 8 отмечены средние по региону исследования расчетная лесосека и запас леса на гектаре. Особенностью лесничеств является то, что значительная доля лесов находится в условиях застойного увлажнения. Лесничества кластера № 9 по запасу леса на гектаре в среднем пре-

восходят лесничества кластера № 8, но уступают лесничествам кластера № 2. Лесничества кластера № 9 по своим характеристикам занимают промежуточное, или переходное, положение между лесничествами кластеров № 2 и 8. Лесничества малых кластеров № 4, 6 и 7 имеют самый высокий запас леса на гектаре и по ряду учитываемых переменных схожи. Однако различия по другим переменным не позволяют объединить их в один крупный кластер. Лесничество кластера № 5 близко по природно-производственным условиям с лесничествами кластера № 3, но его расчетная лесосека по хвойному компоненту небольшая, что не свойственно лесничествам кластера № 3. Лесничество кластера № 1 имеет много общего с лесничествами кластера № 2, но леса в нем несколько продуктивнее, о чем свидетельствует средний запас леса на гектаре по породам.

Результаты исследования могут быть учтены при решении вопросов организации и развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса ответственными органами в ходе разработки государственной политики и нормативных документов в сфере лесного хозяйства и учета лесных ресурсов, а также частным бизнесом при стратегическом планировании деятельности по заготовке и переработке древесины. Кроме того, методика исследований может быть применена для анализа лесных территорий других регионов России. Это позволит переносить успешный опыт развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса на местности со схожими условиями в масштабах страны, а также даст возможность оценивать перспективность применения тех или иных подходов в управлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пасько О.А., Захарченко А.В., Ковязин В.Ф. Анализ землеустройства лесного фонда // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 2. С. 127–138.
Pasko O.A., Zakharchenko A.V., Kovyazin V.F. Analysis of Land Management of the Forest Fund. *Bulletin of the Tomsk Polytechnical University*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 127–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3049>
2. Сукачев В.Н. Избр. тр. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. 418 с.
Sukachev V.N. *Selected Works*, vol. 1. Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 418 p. (In Russ.).
3. Хлюстов В.К., Ганихин А.М., Короткая С.В. Ресурсно-экологическое районирование лесов Нижегородской области // Природообустройство. 2021. № 3. С. 128–136.
Khlyustov V.K., Ganikhin A.M., Korotkaya S.V. Resource and Ecological Zoning of Forests of the Nizhny Novgorod Region. *Природообустройство*, 2021, no. 3, pp. 128–136. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-3-128-136>
4. Coates A., Ng A.Y. Learning Feature Representations with K-Means. *Neural Networks: Tricks of the Trade*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, vol. 7700, pp. 561–580. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8_30
5. Cochran W.G., Snedecor G.W. *Statistical methods*. Iowa State University Press, 1980. 507 p.
6. DeArmond D., Ferraz João B.S., Higuchi N. Natural Recovery of Skid Trails: a Review. *Canadian Journal of Forest Research*, 2021, vol. 51, no. 7, pp. 948–961. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0419>

7. Eliasson L., Bengtsson J., Cedergren J., Lageson H. Comparison of Single-Grip Harvester Productivity in Clear- and Shelterwood Cutting. *Journal of Forest Engineering*, 1999, no. 10, pp. 43–48.
8. Gendler S., Prokhorova E. Risk-Based Methodology for Determining Priority Directions for Improving Occupational Safety in the Mining Industry of the Arctic Zone. *Resources*, 2021, vol. 10, no. 3, art. 20. <https://doi.org/10.3390/resources10030020>
9. George A.K., Kizha A.R., Kenefic L. Economic Feasibility of Timber Harvesting in Lowlands. Exceeding the Vision: Forest Mechanisation of the Future. *Proceedings of the 52nd International Symposium on Forestry Mechanization*. Sopron, Hungary, University of Sopron Press, 2019, pp. 379–393.
10. Gerasimov Y., Sokolov A.P., Fjeld D. Improving Cut-to-Length Operations Management in Russian Logging Companies Using a New Decision Support System. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 89–105.
11. Goodsite M., Swanström N. *Towards a Sustainable Arctic*. World Scientific Publishing Europe Ltd., 2023. 280 p. <https://doi.org/10.1142/q0390>
12. Härdle W.K., Simar L. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Berlin, Germany, Springer Cham Publ., 2019. 559 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26006-4>
13. Hartwell C.A. In Our (Frozen) Backyard: the Eurasian Union and Regional Environmental Governance in the Arctic. *Climatic Change*, 2023, vol. 176, art. 45. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03491-7>
14. Hiesl P., Benjamin J.G. Applicability of International Harvesting Equipment Productivity Studies in Maine, USA: A Literature Review. *Forests*, 2013, vol. 4, iss. 4, pp. 898–921. <https://doi.org/10.3390/f4040898>
15. Ilintsev A., Nakvasina E., Högbom L., Bogdanov A. Influence of Ruts on the Physical Properties of Gleyic Retisols After Logging Machinery Passage. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 37, iss. 4, pp. 254–263. <https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2085785>
16. Jaeger A., Banks D. Cluster analysis: A modern statistical review. *WIREs Computational Statistics*, 2023, vol. 15, iss. 3, art. 1597. <https://doi.org/10.1002/wics.1597>
17. Kaiser H.F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 1960, vol. 20, iss. 1, pp. 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
18. Kaiser H.F. The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. *Psychometrika*, 1958, vol. 23, pp. 187–200. <https://doi.org/10.1007/BF02289233>
19. Kaiser H.F., Rice J. Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement*, 1974, vol. 34, iss. 1, pp. 111–117. <https://doi.org/10.1177/001316447403400115>
20. Kärhä K., Rönkkö E., Gumse S.I. Productivity and Cutting Costs of Thinning Harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, 2004, vol. 15, iss. 2, pp. 43–56. <https://doi.org/10.1080/14942119.2004.10702496>
21. Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning Productivity and Cost for Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, iss. 2, pp. 43–54.
22. Klaes B., Struck J., Schneider R., Schueler G. Middle-term Effects After Timber Harvesting with Heavy Machinery on a Fine-Textured Forest Soil. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, iss. 6, pp. 1083–1095.
23. Kormanek M., Baj D. Analysis of Operation Performance in the Process of Machine Wood Harvesting with Fao Far 6840 Mini-Harvester. *Agricultural engineering*, 2018, vol. 22, iss. 1, pp. 73–82.
24. Labelle E.R., Soucy M. Effect of Tree Form on the Productivity of a Cut-to-Length Harvester in a Hardwood Dominated Stand. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 37, iss. 1, pp. 175–183.

25. Liubachyna A., Bubbico A., Secco L., Pettenella D. Management Goals and Performance: Clustering State Forest Management Organizations in Europe with Multivariate Statistics. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 12, art. 504. <https://doi.org/10.3390/f8120504>
26. Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A., Han H.S., Weiskittel A. Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 38–54. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00156-5>
27. Meira Castro A.C., Nunes A., Sousa A., Lourenço L. Mapping the Causes of Forest Fires in Portugal by Clustering Analysis. *Geosciences*, 2020, vol. 10, iss. 2, art. 53. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020053>
28. Melchiori L., Nasini G., Montagna J.M., Corsano G. A Mathematical Modeling for Simultaneous Routing and Scheduling of Logging Trucks in the Forest Supply Chain. *Forest Policy and Economics*, 2022, vol. 136, art. 102693. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102693>
29. Mokhiev A., Medvedev S. Assessment of Road Density in Logging Areas Using Geographical Information Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, All-Russian scientific-technical conference "Digital technologies in forest sector"*, 26–27 March 2020, Saint Petersburg, Russian Federation, vol. 507, art. 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012022>
30. Mutttilainen H., Hallikainen V., Miina J., Vornanen J., Vanhanen H. Forest Owners' Perspectives Concerning Non-Timber Forest Products, Everyman's Rights, and Organic Certification of Forests in Eastern Finland. *Small-scale Forestry*, 2023, vol. 22, pp. 69–101. <https://doi.org/10.1007/s11842-022-09528-6>
31. Olivera A., Visser R., Acuna M., Morgenroth J. Automatic GNSS-enabled Harvester Data Collection as a Tool to Evaluate Factors Affecting Harvester Productivity in a Eucalyptus Spp. Harvesting Operation in Uruguay. *International Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 27, iss. 1, pp. 15–28. <https://doi.org/10.1080/14942119.2015.1099775>
32. Parente J., Pereira M.G., Tonini M. Space-Time Clustering Analysis of Wildfires: the Influence of Dataset Characteristics, Fire Prevention Policy Decisions, Weather and Climate. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 559, pp. 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.129>
33. Proto A.R., Macrì G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. *European Journal of Forest Research*, 2018, vol. 137, pp. 143–151. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>
34. Salimova G., Ableeva A., Lubova T., Sharafutdinov A., Araslanbaev I. Multidimensional Modeling of the Economy of Forest Management and Reforestation. *Ecological Modelling*, 2022, vol. 472, art. 110098. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110098>
35. Scoti M.S.V., Mascarenhas A.R.P., Rebelo A.C., Fernandes I.M., Vendruscolo J., Rocha J.D.S., Moreto R.F. Current Practices of Conducting Forest Management Plans in the Amazon May Risk the Survival of Timber Species. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 82589–82600. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28311-4>
36. Schreiber J.B. Issues and Recommendations for Exploratory Factor Analysis and Principal Component Analysis. *Research in Social and Administrative Pharmacy*, 2021, vol. 17, iss. 5, pp. 1004–1011. <https://doi.org/10.1016/j.sapharm.2020.07.027>
37. Senko S. Nordic Forest Solutions as an Opportunity to Reform the Forestry Sector in Russia: A Case Study in the Republic of Karelia. *Dissertationes Forestales*, 2021, vol. 320, 61 p. <https://doi.org/10.14214/df.320>
38. Shabaev A., Sokolov A., Urban A., Pyatin D. Optimal Planning of Wood Harvesting and Timber Supply in Russian Conditions. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 6, art. 662. <https://doi.org/10.3390/f11060662>

39. Shegelman I., Budnik P., Baklagin V., Galaktionov O., Khyunninen I., Popov A. Analysis of Natural-Production Conditions for Timber Harvesting in European North of Russia. *Central European Forestry Journal*, 2019, vol. 65, iss. 2, pp. 81–91.

40. Spinelli K., Magagnotti N. The Effect of Harvest Tree Distribution on Harvesting Productivity in Selection Cuts. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 28, iss. 7, pp. 701–709. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.821517>

41. Tutmez B., Ozdogan M.G., Boran A. Mapping Forest Fires by Nonparametric Clustering Analysis. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, pp. 177–185. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0417-4>

42. Varol T., Emir T., Akgul M., Ozel H.B., Acar H.H., Cetin M. Impacts of Small-Scale Mechanized Logging Equipment on Soil Compaction in Forests. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, vol. 20, pp. 953–963. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00182-5>

43. Zykov S.V., Dayneko D.V. The Analysis of the Russian Forest Industry. *Forest Industry of Russia*. Singapore, Springer Publ., 2022, pp. 17–103. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9861-3_2

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 674.812

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-136-148

Режимы пропитки сортиментов из древесины сосны маслянистыми антисептиками

В.А. Шамаев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Y-9044-2018](https://orcid.org/0000-0002-1762-7956).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

И.Н. Медведев, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAS-2731-2020](https://orcid.org/0000-0002-8214-3333).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8214-3333>

А.В. Руссу[✉], аспирант; ResearcherID: [AAH-9550-2019](https://orcid.org/0000-0001-8525-0348).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394036; drevstal@mail.ru, medved-vrn82@mail.ru, arussu@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 12.08.22 / Одобрена после рецензирования 27.11.22 / Принята к печати 30.11.22

Аннотация. Исследованы технологические свойства масляных пропиток, применяемых при изготовлении шпал и столбов линий электропередач из древесины мягких лиственных пород. Цель – оптимизация параметров модифицирования древесины при производстве железнодорожных шпал и столбов линий электропередач для увеличения срока их службы. Анализируемый фактор – глубина поглощения поперек волокон. Использована лабораторная пропиточная установка с автоклавом, рабочее давление которого – до 20 атм. Маслянистый антисептик объемом 10 л нагревается трубчатыми электронагревателями до температуры 110 °С. Установка по своему назначению эквивалентна работе автоклава в цехе пропитки древесины. При разных режимах было пропитано 25 образцов шпал и 25 образцов столбов линий электропередач. Длительность процесса составляет от 2 до 4 ч. Нормированное содержание антисептика 19 % обеспечивается давлением 10–14 атм при продолжительности выдержки образцов 60 мин. Прогрев заготовки оказался наиболее влияющим на глубину поглощения фактором – как для шпал, так и для столбов. Показано, что нормальная глубина пропитки в случае применения в качестве антисептика каменноугольного масла достигается при температуре древесины не менее 70 °С, поскольку вязкость снижается в 2 раза. Для поглотительного масла такой зависимости не наблюдается, его вязкость мало зависит от температуры. Данную температуру следует рекомендовать для поглотительного и сланцевого масел, т. к. для предотвращения растрескивания древесины минимально допустимый перепад между температурой пропитываемого вещества (110 °С) и температурой древесины (70 °С) не должен превышать 40 °С. Из 6 антисептиков рекомендуемые для применения – каменноугольное, поглотительное, «Шубарколь комир» и антраценовое масла. Для них разработаны режимы пропитки шпал и опор линий

электропередач. При выдержке заготовок шпал и столбов в вакууме с разрежением 0,2 атм в течение 40 мин полностью исключается вытекание масла из заготовок после окончания пропитки.

Ключевые слова: пропитка древесины, шпала, столб линии электропередач, антисептик, маслянистый антисептик, масло каменноугольное, масло сланцевое

Для цитирования: Шамаев В.А., Медведев И.Н., Руссу А.В. Режимы пропитки сортиментов из древесины сосны маслянистыми антисептиками // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 136–148. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-136-148>

Original article

Impregnation Regimes of Pine Wood Assortments with Oily Antiseptics

Vladimir A. Shamaev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Y-9044-2018](https://orcid.org/0000-0002-1762-7956),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Ilya N. Medvedev, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAS-2731-2020](https://orcid.org/0000-0002-8214-3333),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8214-3333>

Alexander V. Russu[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [AAH-9550-2019](https://orcid.org/0000-0001-8525-0348),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozova, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394036, Russian Federation; drevstal@mail.ru, medved-vrn82@mail.ru, arussu@mail.ru[✉]

Received on August 12, 2022 / Approved after reviewing on November 27, 2022 / Accepted on November 30, 2022

Abstract. Technological properties of oil impregnations used in the manufacture of sleepers and poles of power transmission lines made of soft hardwoods are investigated. The aim is to optimize the parameters of wood modification during the production of railway sleepers and poles of power transmission lines and to increase their service life. The analyzed factor is the absorption depth across the fibers. A laboratory impregnation unit with an autoclave with an operating pressure of up to 20 atm was used. The oily antiseptic in the volume of 10 liters is heated by tubular electric heaters up to the temperature of 110 °C. The installation by its purpose is equivalent to the work of autoclave in the wood impregnation shop. At different modes, 25 samples of sleepers and 25 samples of power transmission poles were impregnated. The duration of the process is from 2 to 4 hours. The standardized antiseptic content of 19 % is provided by the pressure of 10–14 atm at the duration of the samples holding time of 60 min. Heating of the workpiece turned out to be the most influential factor on the depth of absorption – both for sleepers and poles. It is shown that the normal depth of impregnation is provided at a wood temperature of at least 70 °C for coal oil, as its viscosity is halved. For absorbent oil such dependence is not observed, its viscosity depends little on temperature. This temperature should be recommended for absorbent and shale oils, as the minimum allowable difference between the temperature of the impregnating agent of 110 °C and the temperature of the wood of 70 °C should not exceed 40 °C to prevent cracking of the wood. Of the 6 options for antiseptics, the following oils are recommended for use: coal oil, absorbent oil, Shuberkol komir and anthracene oil. For them impregnation regimes for sleepers and power transmission line supports are developed. At exposure of sleepers and poles blanks in vacuum with 0.2 atm rarefaction during 40 min oil leakage from blanks after the end of impregnation is completely excluded.

Keywords: wood impregnation, sleeper, power line pole, antiseptic, oily antiseptic, coal oil, shale oil

For citation: Shamaev V.A., Medvedev I.N., Russu A.V. Impregnation Regimes of Pine Wood Assortments with Oily Antiseptics. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 136–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-136-148>

Введение

Для обеспечения железнодорожных путей в СССР в 70-х гг. прошлого века был взят курс на замену сосновых шпал бетонными [10]. Производство деревянных шпал неуклонно сокращалось [16–18]. К 2018 г. оно уменьшилось с 6 млн до 600 тыс. шт./год. Из этого количества 400 тыс. шт. приходится на «Российские железные дороги», остальное – подъездные пути предприятий и метро. «Российские железные дороги» укладывают шпалы из сосны там, где нельзя положить бетонные: в районах Крайнего Севера, районах с резко континентальным климатом, болотистых районах [6, 14, 15].

В то же время в других странах, например в Китае и США, 90 % всех шпал выполнены из древесины твердых лиственных пород со сквозной пропиткой и гарантируемым сроком службы 50 лет [3, 9, 19]. Допустимая нагрузка на ось в этих странах – 9 т, в РФ – 18 т. Железобетонные шпалы в Европе, США, Японии и Канаде укладывают лишь на подъездных путях [1, 13, 20]. Курс на железобетонные шпалы на магистральных путях ошибочный, т. к. в середине XXI в., т. е. через 30–40 лет, произойдет массовый выход из строя железобетонных шпал по принципу «домино»: металлический каркас в шпале проржавел и полонка одной шпалы удваивает нагрузку на соседнюю, она ломается и так далее по цепочке процесс распространяется по всему полотну [7]. Парализация железнодорожных путей неизбежна, т. к. на замену шпал требуются годы [2, 4, 5].

Перспективным следует считать изготовление железнодорожных шпал, а также столбов линий электропередач (ЛЭП) из модифицированной древесины мягких лиственных пород, запасы которых в РФ неограниченны. Прочностные показатели такой древесины превышают показатели древесины твердых лиственных пород или равны им (ГОСТ 7–2004, 20022.0–2016) [8, 11, 12].

Цель – разработка режимов пропитки маслянистыми антисептиками древесины, используемой при производстве железнодорожных шпал и столбов ЛЭП, для увеличения срока их службы.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья использовались заготовки древесины сосны. Заготовки для шпал имели сечение 100×100 мм, высоту 180 мм, плотность древесины 510 кг/м³ и количество годичных слоев на 1 см 4,4 шт. Заготовки для столбов ЛЭП характеризовались диаметром 130 мм, высотой 180 мм, плотностью древесины 495 кг/м³ и количеством годичных слоев на 1 см 2,7 шт. Для пропитки применялись каменноугольное масло производства «Мечел-Кокс», (г. Челябинск), сланцевое масло С1, смесь каменноугольного масла с 5%-м мыльным раствором, поглотительное и антраценовое (C₁₄H₁₀) масла. Часть экспериментов

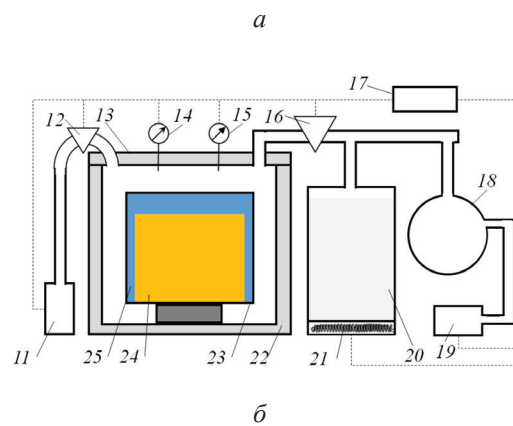
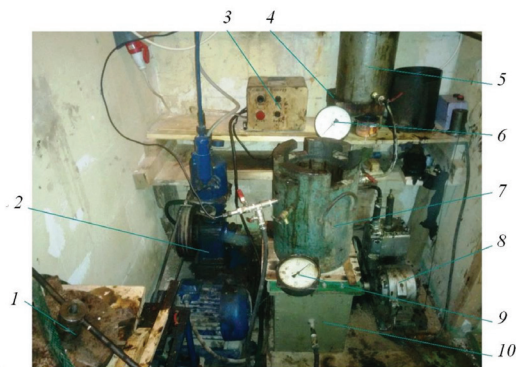
была проведена на каменноугольном масле производства «Шубарколь комир», (г. Караганда). Торцы всех образцов закрывались масляной краской, загущенной порошковым кремнеземом до состояния сметаны.

Для проведения экспериментов была создана лабораторная установка, позволяющая моделировать работу цеха пропитки древесины. Общий вид установки представлен на рис. 1, а, схема работы в режимах ВДВ (вакуум–давление) и ДДВ (давление–давление–вакуум) – на рис. 1, б. Технологические характеристики установки следующие:

Максимальное давление.....	25 атм
Максимальное разрежение.....	0,01 МПа
Объем рабочего автоклава.....	18 л
Объем маневрового автоклава.....	12 л
Объем ресивера.....	10 л
Режим пульта управления.....	ручной
Вакуум-насос.....	ВВН-3
Компрессор.....	УЛК 5/10
Количество загружаемых образцов.....	1
Общее время пропитки:	
минимальное.....	2,2 ч
максимальное.....	3,3 ч
Габариты установки.....	2,2×2,3×1,6 м
Масса.....	780 кг

Рис. 1. Экспериментальная установка пропитки заготовок шпал и столбов ЛЭП: а – общий вид; б – схема работы (1, 13 – крышка автоклава; 2, 19 – компрессор УЛК-5/10; 3, 17 – пульт управления; 4, 21 – трубчатые электронагреватели; 5, 20 – маневровый автоклав; 6, 15 – манометр; 7, 22 – рабочий автоклав; 8, 11 – вакуум-насос ВВН-3; 9, 14 – вакуумметр; 10, 18 – ресивер; 12 – вакуумный затвор; 16 – клапан сброса давления; 23 – рабочая емкость; 24 – заготовка древесины сосны; 25 – пропиточная жидкость)

Fig. 1. Experimental installation for impregnation of sleeper blanks and power line poles: а – general view; б – operating diagram (1, 13 – autoclave lid; 2, 19 – compressor ULK-5/10; 3, 17 – control panel; 4, 21 – tubular electric heaters; 5, 20 – shunting autoclave; 6, 15 – pressure gauge; 7, 22 – working autoclave; 8, 11 – vacuum pump VVN-3; 9, 14 – vacuum gauge; 10, 18 – receiver; 12 – vacuum seal; 16 – pressure relief valve; 23 – working tank; 24 – pine wood harvesting; 25 – impregnating liquid)



Установка для пропитки работает следующим образом. В автоклав загружается образец шпалы или столба ЛЭП, и автоклав закрывается крышкой. В маневровый автоклав заливается маслянистый антисептик в количестве 10 л и нагревается трубчатыми электронагревателями до температуры 110 °С. Вакуумным насосом в автоклаве создается разрежение до 0,01 МПа. В рабочий автоклав из маневрового автоклава заливается горячий антисептик, и включается компрессор, обеспечивающий давление до 20 атм. После окончания процесса давление сбрасывается и создается разрежение вакуум-насосом. Воздух с парами антисептика подается в ресивер. Управление процессом осуществляется с пульта. Длительность процесса составляет в зависимости от режима от 2 до 4 ч (ГОСТ 20022.5–93, 20022.7–82, 20012.0–82).

Было принято 3 режима пропитки: режим *A* – масло «Мечел-Кокс», давление 8–12 атм; режим *B* – масло «Мечел-Кокс», давление 18–20 атм; режим *C* – поглотительное масло, давление 8–12 атм. Во всех 3 вариантах температура проведения процесса составляла 90 °С.

После пропитки образцы извлекаются из автоклава, взвешиваются и раскалываются по волокну на 2 равные части по диаметру или центру, как показано на рис. 2, и штангенциркулем измеряется глубина пропитанной зоны поперек волокон. Всего с использованием разных режимов было пропитано 25 образцов шпал и 25 образцов столбов ЛЭП (ГОСТ 20022.14–84, 20022.13–81, 56879–2016).

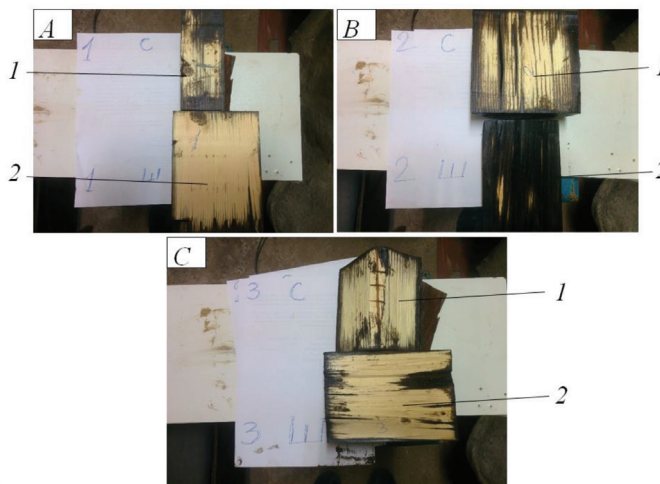


Рис. 2. Образцы шпал (2) и столбов ЛЭП (1) после пропитки в соответствии с режимами *A*, *B*, *C* и раскалывания пополам в середине образца

Fig. 2. Samples of sleepers (2) and power line poles (1) after impregnation in accordance with modes *A*, *B*, *C* and splitting in half in the middle of the sample

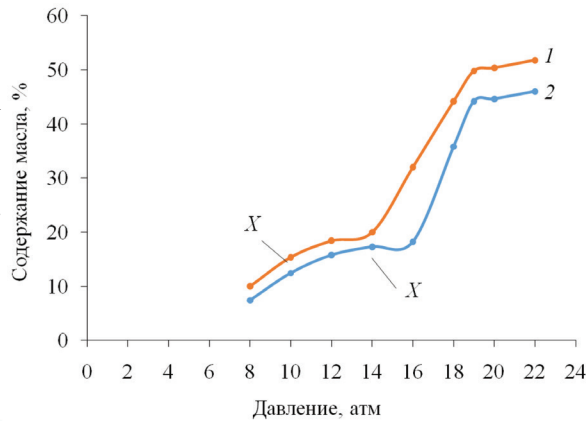
Результаты исследования и их обсуждение

Эксперименты на каменноугольном масле «Мечел-Кокс». В качестве анализируемого фактора принята глубина поглощения поперек волокон, мм. Содержание антисептика во всех случаях составила 80–90 кг/м³, давление – 8–12 атм. С увеличением давления до 18–20 атм происходила пропитка образ-

цов не только поперек волокон, но и преимущественно с торца, т. е. торцовое перекрытие краской не выдерживало больших давлений и пропитка получалась сквозной, что наглядно видно из рис. 2. Тем не менее зависимость поглощения от давления была изучена, что иллюстрирует рис. 3. Как следует из рисунка, нормированное содержание антисептика 19 % обеспечивается давлением 10–14 атм при продолжительности выдержки 60 мин. Поэтому во всех остальных экспериментах максимальное давление принято 12 атм.

Рис. 3. Зависимость содержания каменноугольного масла в шпалах (1) и столбах (2) от давления. Точка X соответствует нормативному содержанию масла (90 кг/м³)

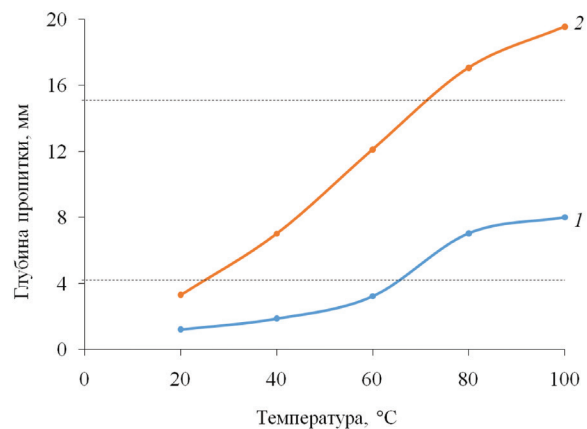
Fig. 3. Dependence of the content of coal oil in sleepers (1) and posts (2) on pressure. Point X corresponds to the standard oil content (90 kg/m³)



На рис. 4 представлена зависимость глубины поглощения от температуры древесины после прогрева. Этот показатель – наиболее влияющий фактор как для шпал, так и для столбов. Рисунок показывает, что нормальная глубина пропитки обеспечивается при температуре древесины не менее 70 °С, причем эта температура является оптимальной и для шпал, и для столбов. Прогрев до температуры свыше 80 °С является нецелесообразным. Причина в том, что при температуре 70 °С вязкость каменноугольного масла падает почти в 2 раза и оно легко проникает в древесину. Для поглощительного масла такой зависимости не наблюдается, его вязкость мало зависит от температуры. Тем не менее эту же температуру следует рекомендовать для поглощительного и сланцевого масел, т. к. минимально допустимый перепад между температурой пропитывающего вещества (110 °С) и температурой древесины (70 °С) не должен превышать 40 °С, иначе древесина растрескивается.

Рис. 4. Зависимость глубины пропитки каменноугольным маслом от температуры древесины: 1 – шпалы; 2 – столбы. Пунктирными линиями (здесь и на рис. 5) обозначено нормативное содержание антисептика

Fig. 4. Dependence of impregnation depth on wood temperature: 1 – sleepers; 2 – poles. The dotted line (here and in Fig. 5) corresponds to the standard content of antiseptic



На рис. 5, *а* показана зависимость глубины поглощения от продолжительности выдержки под давлением. Как видно из рисунка, оптимальное время выдержки для шпал и столбов составляет 30 мин, причем эта зависимость близка к линейной. На рис. 5, *б* представлена зависимость глубины поглощения от остаточного давления в автоклаве, атм, при продолжительности выдержки 40 мин. Как следует из рисунка, нормативная глубина поглощения начинается для шпал с 0,5 атм, для столбов – с 0,4 атм. Тем не менее стабильные результаты по глубине поглощения обеспечиваются при вакууме 0,3 атм. Если снизить продолжительность пребывания в вакууме с 40 до 20 мин, то нормированная глубина поглощения для шпал достигается при разрежении 0,1 атм, для столбов – 0,2 атм.

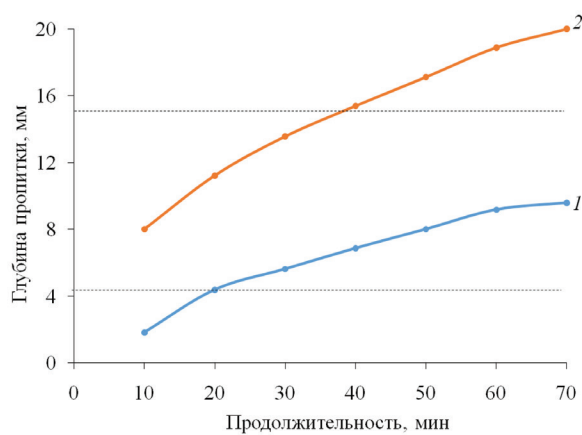


Рис. 5. Зависимость глубины пропитки каменноугольным маслом: *а* – от времени выдержки под давлением; *б* – от глубины разрежения (вакуума): 1 – шпалы; 2 – столбы

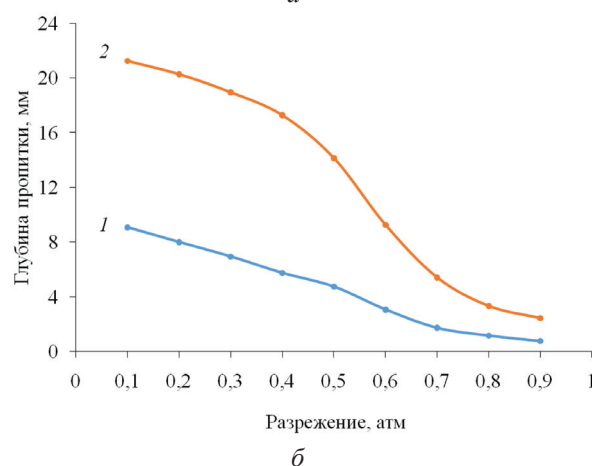


Fig. 5. Dependence of coal oil impregnation depth: *a* – on the holding time under pressure; *b* – on the depth of rarefaction (vacuum): 1 – sleepers; 2 – poles

Интересно отметить, что, судя по рис. 4 и 5, общее поглощение масла для заготовок столбов значительно выше, чем для заготовок шпал. Это объясняется присутствием в заготовках столбов заболонной зоны с большим впитыванием масла по сравнению с ядровой зоной.

Эксперименты на поглотительном, антраценовом и сланцевом маслах, каменноугольном масле «Шубарколь комир» и смеси масла с мыльной водой 1:1. Для пропитки образцов шпал был принят следующий режим: прогрев заготовок в термокамере до температуры 70 °С;

вакуумирование заготовок при глубине вакуума 0,2 атм в течение 20 мин; выпуск масла, поднятие давления до 8 атм, выдержка под давлением в течение 40 мин;

сброс давления, выдержка на складе 10 дн.

Керны по глубине пропитки брались на расстоянии 10 мм от торца образца и в центре.

Образцы опор ЛЭП пропитывались при такой последовательности действий:

прогрев заготовок до температуры 70 °С в термошкафу;

создание в автоклаве предварительного давления 1,5 атм, выдержка под давлением на протяжении 15 мин;

выпуск масла, подъем давления до 8 атм, выдержка под давлением в течение 20 мин;

сброс давления, вакуумирование при разрежении 0,2 атм в течение 10 мин;

сброс вакуума, выдержка на складе 10 дн.

Результаты пропитки образцов шпал и столбов поглотительным маслом представлены в табл. 1.

Таблица 1

Глубина пропитки шпал и столбов ЛЭП поглотительным маслом, мм

**Depth of impregnation of sleepers
and power transmission line poles with absorbing oil, mm**

Номер керны	Шпалы		Столбы	
	Торец	Середина	Торец	Середина
1	7	5	41	38
2	8	9	27	34
3	6	12	40	45
4	9	8	36	40
5	9	7	28	40
6	–	17	30	31
7	–	10	25	36
8	–	10	39	29
9	–	3	33	22
10	–	3	33	29
<i>Среднее</i>	<i>7,7</i>	<i>8,5</i>	<i>33,2</i>	<i>34,4</i>

Примечание: Среднее поглощение для шпал – 80 кг/м³; для столбов – 92 кг/м³.

Как видно из табл. 1, наблюдается значительный разброс результатов по глубине пропитки для шпал. Показания керны № 6 – 17 мм, – наверняка, относятся к заболони. В целом можно отметить, что при нормативной глубине пропитки для столбов ЛЭП 25,3 мм есть небольшое превышение, а при нормативной глубине пропитки для шпал 5 мм оно составляет в среднем 1,5 раза.

В табл. 2 приведены результаты пропитки образцов шпал и столбов ЛЭП маслами «Шубарколь комир» и сланцевым. Масло «Шубарколь комир» дало хорошие результаты по всем показателям и может быть рекомендовано к использованию. Результат применения сланцевого масла с точки зрения глубины пропитки и поглощения неудовлетворителен как для шпал, так и для столбов.

Таблица 2

**Глубина пропитки и поглощение масла «Шубарколь комир»
и сланцевого масла (среднее по 6 опытам)**

**Impregnation depth and absorption of Shuberkol komir oil
and shale oil (average for 6 experiments)**

Изделие	Глубина пропитки маслом, мм		Поглощение масла, кг/м ³		Поглощение масла, кг/м ³ в пересчете на стандартные размеры шпал и столбов ЛЭП	
	«Шубарколь комир»	сланцевое	«Шубарколь комир»	сланцевое	«Шубарколь комир»	сланцевое
Образцы шпал	5,5	0,5	95	22	37	8,5
Образцы столбов	15,9	2,2	125	35	60	17,0
Шпалы*	7,0	0,5	95	22	–	–
Столбы*	17,0	2,5	125	35	–	–

* После 14 дн. выдержки на складе.

В экспериментах использовалась смесь каменноугольного масла и водного 5%-го раствора технического мыла в соотношении 1:1. Результаты для смеси, а также антраценового и поглотительного масел приведены в табл. 3.

Таблица 3

Глубина пропитки и поглощение масел (среднее по 6 опытам)

Impregnation depth and oil absorption (average for 6 experiments)

Антисептик	Глубина пропитки, мм		Поглощение, кг/м ³	
	Шпалы	Столбы	Шпалы	Столбы
Антраценовое масло	5,5	15,9	95	125
	7,0	17,0		
Поглотительное масло	5,5	19,2	88	105
	5,9	19,9		
Смесь каменноугольного масла и мыльного раствора 1:1	3,0	13,0	72	108
	3,5	13,5		

Примечание: В нижней части строки приведено значение показателя после 14 дн. выдержки на складе.

Как видно из табл. 3, для смеси масла с водой результаты близки к требуемым, но выявились следующие недостатки: через 5–6 ч смесь расслаивалась и выпадал осадок студенистого вида, который при перемешивании не растворялся; на трубах и в насосе появились пятна ржавчины, что требовало дополнительного промыва системы чистым маслом. В связи с этим рекомендуется вместо мыльного водного раствора использовать смесь маслянистого антисептика с отработанным машинным маслом, прошедшим обязательное фильтрование.

Для всех масел, как показывают табл. 2, 3, наблюдался эффект «допропитки», когда через 10–14 дн. хранения на складе глубина пропитки увеличивалась на 0,5–1,5 мм.

Результаты для поглотительного и сланцевого масел аналогичны результатам для каменноугольного масла «Мечел-Кокс» – расхождение не превышало 5 %.

Оптимизация технологических режимов. Таким образом, из всех 6 вариантов антисептиков рекомендуются к применению следующие масла: каменноугольное, поглотительное, «Шубарколь комир» и антраценовое. Разработаны режимы пропитки ими шпал и столбов ЛЭП, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Рекомендуемые параметры для пропитки шпал (режим ВДВ) и столбов ЛЭП (режим ДДВ) маслянистыми антисептиками по данным лабораторных экспериментов

Recommended parameters for impregnation of sleepers (VDV mode) and power line poles (DDV mode) with oily antiseptics according to the data of laboratory experiments

Параметр	Масло			
	каменноугольное	поглотительное	«Шубарколь комир»	антраценовое
<i>Шпалы</i>				
Температура древесины при прогреве заготовок, °С	60	55	50	45
Глубина вакуума при вакуумировании заготовок, атм	0,2			
Продолжительность вакуумирования, мин	40			
Давление пропитки, атм	8			
Продолжительность выдержки под давлением, мин	80	90	100	110
Глубина разрежения при вакуумировании, атм	0,2			
Продолжительность выдержки под вакуумом, мин	40			
<i>Столбы ЛЭП</i>				
Температура древесины при прогреве заготовок, °С	55	50	45	40
Предварительное давление, атм	2	1,5		
Продолжительность выдержки под предварительным давлением, мин	20			
Конечное давление, атм	8			
Продолжительность выдержки под конечным давлением, мин	40	50	60	70
Глубина разрежения при вакуумировании, атм	0,2			
Продолжительность выдержки под вакуумом, мин	40			

Поскольку различие в режимах небольшое, было принято решение разработать универсальные (усредненные) параметры для всех масел при пропитке шпал (режим ВДВ) и столбов ЛЭП (режим ДДВ).

Для шпал:

Температура древесины при прогреве заготовок.....	70–80 °С
Глубина вакуума при вакуумировании заготовок.....	0,2 атм
Продолжительность вакуумирования.....	40 мин
Давление пропитки.....	8–12 атм
Продолжительность выдержки под давлением.....	60 мин
Глубина разрежения при вакуумировании.....	0,2 атм
Продолжительность выдержки под вакуумом.....	40 мин

Для столбов:

Температура древесины при прогреве заготовок.....	70 °С
Предварительное давление.....	2 атм
Продолжительность выдержки под предварительным давлением.....	20 мин
Конечное давление.....	8 атм
Продолжительность выдержки под конечным давлением.....	40 мин
Глубина разрежения при вакуумировании.....	0,2 атм
Продолжительность выдержки под вакуумом.....	40 мин

Эти результаты согласуются с оптимизированными значениями технологических параметров, полученными другими исследователями [2].

Продолжительность прогрева заготовок, указанная нами (20 мин), подходит для малых образцов, для промышленных продолжительность этого процесса должна определяться экспериментально. По предварительным расчетам, она составит от 80 до 120 мин при количестве циклов перекачки масла – 2–3.

При выдержке заготовок шпал и столбов в вакууме с разрежением 0,2 атм в течение 40 мин полностью исключается вытекание масла из заготовок после окончания пропитки.

При использовании в качестве маслянистого антисептика поглотительного масла необходимо учитывать, что его вязкость на 20 % меньше, чем каменноугольного. Однако наличие в молекулах поглотительного масла гидроксильных групп ведет к образованию в древесине физических связей гидроксильных групп целлюлозы с гидроксильными группами молекул поглотительного масла, как следствие, движение масла внутри древесины значительно замедляется. Поэтому продолжительность выдержки под давлением, указанную в табл. 4 для поглотительного масла, необходимо увеличить в 2 раза: для шпал она составляет 120 мин, для столбов ЛЭП – 80 мин.

Выводы

1. Разработанные технологические параметры позволяют получать в лабораторных условиях заготовки шпал с глубиной не менее 5 мм поперек волокон и нормой поглощения 80–90 кг/м³ и столбов линий электропередач с глубиной пропитки 15 мм и нормой поглощения 90–100 кг/м³.

2. При разработке промышленных режимов длительность процессов изменяется в сторону увеличения продолжительности прогрева, пропитки и вакуумирования.

3. Из испытанных антисептиков рекомендуются каменноугольное масло, поглощающее масло и масло «Шубарколь комир». Для них оптимальные режимы одинаковы и для шпал, и для столбов линий электропередач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Alizadeh M., Yousefian K., Zakeri J.A. Numerical and Experimental Investigation into Longitudinal Resistance of Ballasted Railway Track with Wooden Sleepers. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 350, art. 128880. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128880>

2. Bae Y.H., Kim J., Hyun B.J., Lee I.W. Investigation of Flexural Stiffness and Strength of Wooden Sleeper to Establish Performance Requirements of Plastic Sleeper. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2020, vol. 23, iss. 9, pp. 821–836. <https://doi.org/10.7782/jksr.2020.23.9.821>

3. Esmacili M., Majidi-Parast S., Hosseini A. Comparison of Dynamic Lateral Resistance of Railway Concrete, Wooden and Steel Sleepers Subjected to Impact Loading. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, vol. 20, iss. 8, pp. 1779–1806. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1468804>

4. Fast D.A., Shramenko V.P., Starukh O.S., Ivanchenko O.V., Strachnyi I.L. Simulation of Performance of Subway Wooden Sleepers and Determination of Their Tense State Using Lira Software Complex. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 708, iss. 1, art. 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012006>

5. Itoi K., Nagamine N., Gouda W., Tsubokawa Y., Kato S. Improving Inspection Accuracy of Wooden Sleeper Deterioration Analysing Forward View Image from Train Cab. *The Proceedings of the Transportation and Logistics Conference*, 2021, vol. 30. <https://doi.org/10.1299/jsmetld.2021.30.ss2-4-5>

6. Kosmin V.V. Highways and Railways in the Updated Transport Strategy of the Russian Federation. *Transport Technician: Education and Practice*, 2022, vol. 3, iss. 1, pp. 80–87. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2022.1.80-87>

7. Markulik Š., Petrik J., Šolc M., Blaško P., Palfy P., Sütőová A., Girmanová L. Analysis of Fault Conditions in the Production of Prestressed Concrete Sleepers. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, iss. 2, art. 928. <https://doi.org/10.3390/app12020928>

8. Medvedev I., Parinov D., Shamaev V. Continuous Impregnation of Wood from the end Face Under Pressure With Various Compositions. *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Modern Machines, Equipment and IT Solutions for Industrial Complex: Theory and Practice”*, FSBE Institution of Higher Education Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2021. https://doi.org/10.34220/mmeitsic2021_245-249

9. Minghui W., Jian W., Qiao Z. Intelligent Integral Improvement Technology of Double Block Sleeper Production Line of Zheng-Wan High-Speed Railway. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 455, iss. 1, art. 012137. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/455/1/012137>

10. Parinov D., Medvedev I., Shamaev V. Economic Justification of the Organization of Production of Power Transmission Poles from Modified Wood. *Materials of the International Scientific and Practical Conference “Green Economy: Iforest”*, FSBE Institution of Higher Education Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2022. https://doi.org/10.34220/zeif2022_86-90

11. Parinov D., Medvedev I., Shamaev V. Resource-Saving Technology for the Production of Power Line Poles from Soft Hardwood. In *Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference "Environmental and resource-saving technologies in science and technology"*, FSBE Institution of Higher Education Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2022. https://doi.org/10.34220/erstst2021_159-163
12. Shamaev V.A., Dornyak O.R., Medvedev I.N., Russu A.V., Garkusha O.S. Stabilization of Shapes and Dimensions of Compressed Wood Using Chemical and Physical Methods. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 390, art. 5044. 11 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339005044>
13. Starck M., Heidel A., Brischke C., Militz H. Incising and Double Impregnation of Beech Sleepers—Investigation of an Alternative Preservation System for Wooden Railway Sleepers. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2022, vol. 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.814049>
14. Svatovskaya L., Shershneva M.V., Savelyeva M.Y. Geocoprotective Technologies of Storage of Used Wooden Sleepers. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 189, pp. 605–609. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.096>
15. Teng Z. Trends in Development of Chinese-Russian Relations in the Field of Railway Transport. *World of Transport and Transportation*, 2023, vol. 21, iss. 1, pp. 40–48. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-5>
16. Tuley Y., Bugaets N., Malishevskaya A. Research into Parameters of Energy Loss When Trains Influence the Track with Wooden Sleepers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 6, iss. 1, no. 84, pp. 9–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85851>
17. Vilniškis R., Vaiškūnaitė R. Complex Contamination Research and Hazard Assessment of the Waste of the Wooden Railway Sleeper. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2018, vol. 13, iss. 4, pp. 385–403. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2018-13.424>
18. Vilniškis R., Vaiškūnaitė R. Research and Evaluation of the Aromatic Hydrocarbons in the Polluted Wooden Railway Sleepers. *Proceedings of 10th International Conference "Environmental Engineering"*, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2017. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.060>
19. Wojciechowski A., Doliński A., Radziszewska-Wolińska J.M., Wołosiak M. Environmentally Friendly Recycling of Wooden Railway Sleepers. *Problemy Kolejnictwa. Railway Reports*, 2018, no. 181, pp. 139–146. <https://doi.org/10.36137/1818e>
20. Yasuno T., Okano M., Fujii J. Wooden Sleeper Deterioration Detection for Rural Railway Prognostics Using Unsupervised Deeper FCDDs. ArXiv, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.05103>

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 674:691.11:694.14

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-149-161

Научное обоснование использования древесины осины в деревянных клееных конструкциях

А.А. Титунин¹✉, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [W-5121-2017](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

М.С. Геворкян², аспирант; ResearcherID: [GSD-6751-2022](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-2421>

А.А. Федотов¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1155-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Т.Н. Вахнина¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1116-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

И.В. Сусоева¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1053-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>


¹Костромской государственный университет, ул. Дзержинского, д. 17, г. Кострома, Россия, 156007; a_titunin@ksu.edu.ru✉, aafedotoff@yandex.ru, t_vachnina@mail.ru, i.susoeva@yandex.ru

²Костромская государственная сельскохозяйственная академия, ул. Учебный городок, д. 34, пос. Караваево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; gevmeline@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.10.22 / Одобрена после рецензирования 03.02.23 / Принята к печати 07.02.23

Аннотация. Одним из перспективных материалов для строительства являются деревянные клееные конструкции. Согласно действующим нормативным документам для производства таких конструкций используется, как правило, древесина хвойных пород, запасы которой в промышленно освоенных районах за последние десятилетия значительно снизились. При этом в ряде регионов России есть значительный сырьевой резерв осинового сырья, которая на протяжении многих веков успешно применялась в строительстве зданий и сооружений. Ее физико-механические характеристики отличаются от показателей древесины сосны на 3,2–18,6 %, поэтому она может рассматриваться в качестве альтернативного источника сырьевого обеспечения предприятий деревянного домостроения. Для оценки степени влияния сочетания хвойной и осинового сырья на прочность клееного соединения как одного из основных показателей качества деревянных клееных конструкций выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Расчетным путем определены максимальные касательные и нормальные напряжения клееного шва в заготовках из сосны и осины, которые существенно выше показателей цельной древесины. Значения прочности при скалывании в склеенных ламелях из сосны и осины (4,46–8,06 МПа), полученные в ходе проведения опытов на 1-м этапе исследований, оказались близки к прочности цельной древесины. На 2-м этапе был использован метод дисперсионного анализа, результаты подтвердили предположение о том, что при склеивании ламелей толщиной до 20 мм разница в прочности клееного шва конструкций из сосны и конструкций из сосны и осины незначима. Полученные данные служат основой для дальнейшей работы по диверсификации сырьевых ресурсов при производстве деревянных клееных конструкций за счет вовлечения в переработку маловостребованной древесины осины.

© Титунин А.А., Геворкян М.С., Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., 2023

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

Ключевые слова: клееные конструкции, деревянное домостроение, древесина, хвойные породы, осина, внутренние напряжения, размеры заготовок, прочность клееного шва
Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 22-29-20267.

Для цитирования: Титунин А.А., Геворкян М.С., Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В. Научное обоснование использования древесины осины в деревянных клееных конструкциях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 149–161. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-149-161>

Original article

Scientific Substantiation of Aspen Wood Use in Wooden Glued Structures

Andrey A. Titunin¹✉, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [W-5121-2017](https://orcid.org/0000-0002-0953-0898),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

Meline S. Gevorgyan², Postgraduate Student; ResearcherID: [GSD-6751-2022](https://orcid.org/0000-0002-5406-2421),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-2421>

Alexander A. Fedotov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Tatiana N. Vakhnina¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

Irina V. Susoeva¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

¹Kostroma State University, ul. Dzerzhinskogo, 17, Kostroma, 156007, Russian Federation; titunin62@mail.ru✉, aafedotoff@yandex.ru, t_vakhnina@mail.ru, i.susoeva@yandex.ru

²Kostroma State Agricultural Academy, ul. Uchebnyj gorodok, 34, Karavaevo village, Kostroma, 156530, Russian Federation; gevmeline@inbox.ru

Received on October 20, 2022 / Approved after reviewing on February 3, 2023 / Accepted on February 7, 2023

Abstract. One of the promising materials for construction are wooden glued structures. According to the current regulatory documents, for the production of such structures coniferous wood is usually used, the reserves of which in industrially developed areas have significantly decreased over the last decades. At the same time, in a number of regions of Russia there is a significant raw material reserve of aspen wood, which has been successfully used in the construction of buildings and structures for many centuries. Its physical and mechanical characteristics differ from pine wood from 3.2 to 18.6 %. Therefore, it can be considered as an alternative source of raw materials for wooden house construction enterprises. To assess the degree influence of the combination of coniferous and aspen wood on the strength of the glue joint, as one of the main indicators of the quality of wooden glued structures, a set of theoretical and experimental studies was carried out. Maximum tangential and normal stresses of glue joint in pine and aspen blanks, which are significantly higher than those of solid wood, were determined by calculation. The values of shear strength in glued pine and aspen lamellas (4.46–8.06 MPa), obtained during the experiments at the 1st stage of research, were close to the strength of solid wood. At the 2nd stage the method of dispersion analysis was used, the results confirmed the assumption that when gluing lamellas up to 20 mm thick, the difference



in the strength of the glue joint of structures made of pine and structures made of pine and aspen is insignificant. The obtained data serve as a basis for further work on diversification of raw material resources in the production of wooden glued structures due to the involvement of low-demand aspen wood in processing.

Keywords: glued structures, wooden house construction, wood, coniferous species, aspen, internal stresses, dimensions of blanks, glue joint strength

Acknowledgements: Research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the administration of the Kostroma region within the framework of scientific project No. 22-29-20267.

For citation: Titunin A.A., Gevorgyan M.S., Fedotov A.A., Vakhnina T.N., Susoeva I.V. Scientific Substantiation of Aspen Wood Use in Wooden Glued Structures. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 6, pp. 149–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-149-161>

Введение

Для деревянного домостроения России важным направлением является совершенствование технологий производства материалов и конструкций на основе древесины. Решение этой задачи, как отмечается в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 г., будет способствовать ускоренному росту деревянного домостроения и всего лесопромышленного комплекса страны.

Возможности использования древесины в строительстве значительно расширены благодаря технологии изготовления деревянных клееных конструкций (ДКК) и клееного бруса. Для различных вариантов ДКК характерна некоторая общность – при их изготовлении нет необходимости применять только высококачественное сырье [19]. Поэтому использование многослойных клееных конструкций позволяет снизить расход качественных крупноразмерных пиловочных бревен в деревянном домостроении [9, 11, 14, 19–21].

Для производства деревянных клееных конструкций по требованиям ГОСТ 20850–2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия» используется древесина хвойных пород, запасы которой вблизи центров промышленной переработки за последнее время уменьшились [10, 21]. При этом есть значительное количество осинового сырья. Например, в Костромской области осинового сырья занимают около 10 % лесопокрытых земель [3], а по России ресурсы данного вида оцениваются в 2,6 млрд м³. Применение для производства ДКК не только сосны и ели, но и других пород не противоречит требованиям ГОСТ 20850–2014, который допускает возможность использования различных пород при условии представления в документации информации о физико-механических характеристиках материала древесины и при достаточной прочности и долговечности ДКК.

Обеспечение прочности ДКК – проблема, над решением которой трудятся многие российские и зарубежные ученые. Вопросы анизотропных свойств конструкционных материалов из древесины, оценки их длительной прочности, упругих постоянных древесины, влияния технологических факторов на

стойкость клееных соединений древесины к циклическим температурно-влажностным воздействиям, конструирования и расчета элементов строительных конструкций рассматривались в исследованиях Уголева Б.Н., Ашкенази Е.К., Глухих В.Н., Хрулева В.М., Ковальчука Л.М., Чубинского А.Н., Серова Е.Н., Турковского С.Б., Погорельцева А.А., Федосова С.В., Лабудина Б.В., Черных А.Г., Тамби А.А., Волынского В.Н., Рыкунина С.Н., Гороховского А.Г., Котлова В.Г. и др. Проблемами использования осины в ДКК занимались Куликов В.А., Чубов А.Б., Кожемякина Н.П., Усачева В.Л., Титунин А.А. Анализ работ этих и других авторов показал, что в ряде исследований экспериментальные данные неоднозначны и трудно поддаются интерпретации [25]. Некоторые исследователи для исключения негативного влияния ползучести древесины на прочность ДКК предлагают использовать армирование конструкций стекловолокном и другими материалами [18, 31, 33]. Однако увеличение затрат и усложнение технологии обеспечивают рост прочности только на 14–17 %, а снижение деформируемости – на 4–7 %. Такие значения могут быть сопоставимы с экспериментальным рассеянием результатов, обусловленным вариативностью показателей древесины. Более надежным является внешнее армирование, повышающее прочность в 1,8–2,1 раза [12, 29], но при этом не решаются задачи диверсификации и рационального использования древесных ресурсов страны, а разрабатывается практически новый конструкционный композитный материал. Ученые, исследующие эксплуатационные показатели клееной древесины, отмечают, что ее длительные механические характеристики и влияние различных факторов на эксплуатационные показатели ДКК изучены недостаточно [1, 13, 15, 27].

На кафедре лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Костромского государственного университета много лет ведется оценка возможности использования осины для производства клееной древесины с необходимым комплексом физико-механических показателей. Научная проблема, на решение которой направлено исследование, – покрытие дефицита высококачественной древесины для нужд деревянного домостроения путем вовлечения в хозяйственный оборот маловостребованной осиновой древесины при использовании ее в производстве многослойных деревянных конструкций. Общеизвестным является утверждение, что на внутренние напряжения в клееной древесине влияют размеры склеиваемых ламелей, расположение и ширина годичных слоев, доля поздней древесины и другие особенности макростроения древесины [2, 21]. При этом напряженное состояние в реальных деревянных конструкциях значительно сложнее, чем используемые для характеристики прочности клеевых соединений схемы испытаний [26].

Цель представленного исследования – на основе анализа отечественного и зарубежного опыта оценить степень влияния сочетания хвойной и осиновой древесины на прочность клеевого соединения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись показатели качества клеевых соединений в 2- и 3-слойных конструкциях из ламелей сосны и осины, при скле-

ивании которых рассматривались 2 варианта направления годичных слоев в смежных ламелях: с расположением сердцевины от клевого шва и к клеевому шву [26].

Как отмечают Глухих В.Н. с соавт., не существует полных исследований влияния начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева, на прочность пиломатериалов и клееных балок [6]. Поэтому прогнозирование процесса формирования внутренних напряжений имеет большой научный и практический интерес. При этом использование в ДКК менее распространенных пород обосновано путем моделирования конструкции методом конечных элементов [30]. Традиционным методом планирования эксперимента и обработки его результатов, кроме метода конечных элементов [9, 24], является метод определения прочности при статическом изгибе, позволяющий прогнозировать длительную прочность по результатам кратковременных испытаний [8]. Используются метод аппроксимации экспериментальных зависимостей показателей различными функциями [17], математическое моделирование с применением программного обеспечения [28], разработка математических моделей с помощью классических планов эксперимента [7].

На 1-м этапе исследования для обоснования возможности применения при склеивании древесины разных пород в 2-слойных конструкциях с использованием общеизвестных зависимостей был выполнен расчет максимальных касательного и нормального напряжений в клеевом шве, соответствующих напряженному состоянию сдвига и отрыва в натуральных конструкциях [26]. Осуществлена экспериментальная проверка качества клеевых соединений в конструкциях из сосны (контрольные образцы) и из сосны и осины (опытные образцы). Для проведения опытов образцы изготавливались согласно ГОСТ 20850–14 из заготовок сечением 20×100 мм и длиной 2,0 м. Для склеивания применялся 2-компонентный меламино-мочевинно-формальдегидный клей при норме расхода 400 (1-стороннее нанесение) и 240 (2-стороннее нанесение) г/м². После нанесения клея заготовки выдерживались в течение 4 ч в прессе при давлении 1 МПа, продолжительность доотверждения связующего – 5 дн.

На 2-м этапе эксперимента для оценки влияния сочетания древесных пород в ДКК на качество клевого соединения склеивались 3-слойные конструкции из ламелей. Сечение ламелей – 20×100 мм, длина – 2,0 м. Условия склеивания аналогичны 1-й серии опытов.

Значимость влияния фактора «сочетание пород в ДКК» (фактор *A*) оценивалась с использованием однофакторного дисперсионного анализа. По критерию Фишера проверялась однородность дисперсии фактора *A* и остаточной дисперсии, характеризующей среднее рассеяние значений показателей в эксперименте.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчетов внутренних напряжений в клеевом шве 2-слойных конструкций, склеенных из сосны и из сосны с осинкой, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Моделирование напряженного состояния в клеевом шве при скалывании
Modeling of the stress state in the glued joint during shearing

Характер напряженного состояния	Максимальное напряжение в клеевом шве	Расчетная формула	Расчетное напряжение в клеевом шве, МПа	
			«сосна–сосна»	«сосна–осина»
Сдвиг	Касательное, τ_{\max}	$\tau_{\max} = \tau_{\text{ср}} a_{\text{к}} l \frac{1}{\text{Tg} \frac{a_{\text{к}} l}{2}};$ $a_{\text{к}}^2 = \frac{G_3}{E_2 h_2 h_3} \left(1 + \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right)$	71,4	46,3
Отрыв	Нормальное, σ_{\max}	$\sigma_{\max} = 2Q_0 a_{\text{н}};$ $a_{\text{н}} = \frac{1}{2} \sqrt[4]{\frac{8E_3}{h_3 D}};$ $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)^2}$	19,2	17,7

Примечание: $\tau_{\text{ср}}$ – средняя прочность при скалывании древесины вдоль волокон, МПа; $a_{\text{к}}$ и $a_{\text{н}}$ – коэффициенты прочностных свойств клея и склеиваемых материалов; l – длина клевого шва, м; G_3 – модуль сдвига клея, МПа; E_1, E_2, E_3 – модули упругости склеиваемых материалов и клея, МПа; h_1, h_2, h_3 – толщины склеиваемых материалов и клевого шва, м; Q_0 – разрушающая нагрузка, Н; D – цилиндрическая жесткость, Нм; μ – коэффициент Пуассона для древесины.

Как видно из представленных результатов, при склеивании ламелей из сосны и осины максимальные касательные напряжения (46,3 МПа) ниже, чем при склеивании только сосновых ламелей (71,4 МПа). Разница расчетных нормальных напряжений в клеевом шве при склеивании ламелей из осины и сосны и только из сосны не так существенна – напряжения соответственно равны 17,7 и 19,2 МПа. Полученные расчетные значения в обоих случаях оказались выше предела прочности при скалывании вдоль волокон и при растяжении поперек волокон в случае сосны и осины. На основании этого было сделано предположение, что при испытаниях опытных образцов в лабораторных условиях их разрушение будет происходить по древесине, а не по клеевому шву. То есть прочность клееной конструкции в большей степени определяется прочностью древесины, а не прочностью клевого шва.

По ряду физико-механических свойств древесина осины и сосны имеет близкие значения. Так, например, коэффициент тангенциального разбухания осины на 3,23 % ниже, чем у сосны; модуль упругости при изгибе – на 8,2 %. Различием в строении древесины этих двух пород объясняется разница предела прочности при скалывании вдоль волокон: если у сосны эти значения в радиальной и тангенциальной плоскостях соответственно равны 7,44 и 7,23 МПа, то у осины – 6,15 и 8,42 МПа. Подтверждением гипотезы о возможности обеспечения требуемой прочности клевого шва при небольшой разнице в усушке и разбухании древесины разных пород являются также результаты иссле-

дований по склеиванию осинового тонкослойной древесины при производстве фанеры, выполненных Онегиным В.И. и Чубинским А.Н. [16].

Полученные в ходе исследований результаты позволили предположить, что для снижения разницы в усушке–разбухании смежных слоев осины и сосны при изменении влажности древесины в процессе эксплуатации ДКК предпочтительнее использовать осиновые ламели во внутренних слоях деревянных конструкций. С учетом повышения стойкости осинового материала к воздействию внешней среды в процессе эксплуатации определенный интерес представляет также возможность применения качественной древесины осины в наружных слоях клееных конструкций при соблюдении требований к прочности клеевого соединения и стойкости к воздействию влаги.

Средние арифметические значения результатов определения прочности образцов при скалывании и расслоении клеевых швов, полученные на 1-м этапе экспериментальных исследований [21, 26], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментального определения прочности клеевого шва
Experimental results of glued joint strength determination

Направление годовичных слоев в смежных ламелях (положение сердцевины)	Способ нанесения клея	Предел прочности при скалывании вдоль волокон, МПа		Расслаивание клеевых швов, %	
		контрольный образец	опытный образец	контрольный образец	опытный образец
От клеевого шва	1-стороннее	6,19	4,01	2,58	4,25
К клеевому шву		5,48	3,15	4,26	6,68
От клеевого шва	2-стороннее	8,06	6,14	0,35	0,69
К клеевому шву		6,92	4,46	1,63	3,87

Полученные результаты выявили, что прочность клеевого шва в конструкциях, склеенных из сосны и осины, больше, чем пределы прочности этих пород. О влиянии расположения годовичных слоев в смежных склеиваемых ламелях на прочность ДКК сказано и в работе В.Р. Vital et al. [34].

Для оценки значимости влияния фактора A на прочность клеевого соединения в ДКК на 2-м этапе экспериментальных исследований был использован метод однофакторного дисперсионного анализа. Фактор A варьировался на i уровнях ($i = 1..3$): a_1 – клееный образец «сосна–сосна»; a_2 – «осина–осина»; a_3 – «осина–сосна». Количество дублированных опытов при определении прочности образцов при скалывании в каждой точке плана (на каждом уровне фактора A) $j = 20$. Уровни фактора A , результаты определения прочности клееных образцов при скалывании и статистические параметры представлены в табл. 3.

Общее среднее в эксперименте $\bar{Y} = 6,15$ МПа. Проверка однородности дисперсий S_j^2 выполнена по критерию Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена – 0,405; табличное, определенное на уровне значимости 0,05 при числе степеней свободы в каждой точке экспериментального плана $20 - 1 = 19$, равняется 0,538. Расчетное значение меньше табличного, следовательно, проверка подтвердила однородность дисперсий выборок.

Таблица 3

**Прочность клееной древесины при скальвании
и статистические параметры фактора *A***
Shear strength of glued laminated wood and statistical parameters of factor *A*

Фактор <i>A</i>	Значения выходной величины Y_{ij} , МПа	Среднее арифметическое уровня \bar{Y}_i , МПа	Дисперсия уровня S_i^2
Сосна–сосна	7,97; 5,93; 8,36; 7,33; 6,88; 6,98; 6,11; 6,93; 6,66; 6,13; 6,51; 7,54; 7,63; 5,30; 5,35; 5,92; 5,37; 5,90; 5,26; 6,05	6,51	0,859
Осина–осина	8,39; 4,36; 5,24; 7,14; 5,01; 5,49; 5,06; 6,31; 5,56; 6,47; 6,65; 5,31; 4,12; 8,27; 4,15; 5,98; 7,32; 4,00; 5,59; 5,85	5,81	1,641

Дисперсия фактора *A* – 2,461; остаточная дисперсия (средняя в эксперименте) $S_n^2 = 1,350$. Проверка однородности дисперсии фактора *A* и остаточной дисперсии выполнена по критерию Фишера. Расчетное значение критерия – $2,461/1,350 = 1,823$; табличное, при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы для фактора *A* – 2, для остаточной дисперсии – $3(20 - 1) = 57$, равно 3,17. Расчетное значение критерия Фишера меньше табличного, следовательно, влияние фактора *A* на прочность при скальвании по клеевому шву незначимо (при данных уровнях).

Оценка значимости различий между прочностью при скальвании образцов, полученных при разных схемах сборки клееного материала, выполнена по критерию Стьюдента. Для этого попарно проверена однородность средних арифметических \bar{Y}_i прочности клееных образцов разной схемы склеивания. Расчетное значение критерия Стьюдента определялось по формуле

$$t_p = \frac{|\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2|}{\sqrt{\frac{(S_1^2 + S_2^2)}{n}}}$$

Табличное значение критерия Стьюдента (t_t) устанавливалось по уровню значимости и числу степеней свободы: при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы $2n - 2 = 38$ $t_t = 2,024$. Результаты проверки значимости различий представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значимость различий прочности клееных образцов
Significance of differences in strength of glued specimens

Сравниваемые схемы склеивания	Расчетный критерий Стьюдента	Значимость различий
«Сосна–сосна» – «сосна–осина»	1,124	$t_p < t_t$
«Сосна–сосна» – «осина–осина»	1,977	

Поскольку для всех схем склеивания при проверке значимости различий средних арифметических прочности образцов при скалывании расчетный критерий Стьюдента меньше табличного, то различия между уровнями фактора A незначимы. Однако следует отметить, что при сравнении схем сборки материала «сосна–сосна» и «осина–осина» расчетный критерий Стьюдента довольно близок к критическому $t_{\alpha} = 2,024$.

Описанные результаты достигнуты, скорее всего, потому, что древесина сосны и осины имеет близкие значения линейного и объемного разбухания. Поэтому в приграничном слое и в самом клеевом шве внутренние напряжения не превышают предела прочности и не приводят к разрушению клееной конструкции.

Значения прочности клеевого соединения, приведенные в данной статье, достаточно хорошо согласуются с результатами исследований по склеиванию осинового шпона при производстве фанеры, выполненных Онегиным В.И. и Чубинским А.Н. [16]. Ими получена требуемая прочность клеевого шва фанеры из шпона толщиной до 3 мм. В нашем исследовании толщина склеиваемого материала была увеличена до 20 мм. Тем не менее можно утверждать, что условия адгезионного взаимодействия клея и древесины в экспериментах со склеиванием шпона и ламелей сопоставимы.

Разброс значений прочности при скалывании по клеевому шву образцов клееной древесины объясняется влиянием ряда факторов процесса склеивания материала. Так, Серов Е.Н. и Лабудин Б.В. в своих работах отмечали, что клееной древесине свойственна повышенная анизотропия. Увеличение прочности древесины вдоль волокон вследствие повышения ее однородности и снижения количества дефектов клееной древесины сопровождается уменьшением прочности поперек волокон из-за наличия кососрезных волокон в каждом слое и склеивания ламелей по этим скосам, а в зоне сучков – практически по торцам перерезанных волокон [20]. Положительное воздействие длины сращиваемых ламелей на прочность ДКК указывают и другие исследователи. В частности, в работе Чубинского А.Н. с соавт. отмечается, что прочность при статическом изгибе образцов с шипованным зубчатым соединением возрастает с увеличением длины сращиваемых ламелей. Ламели длиной более 200 мм обеспечивают прочность заготовок, соответствующую требованиям российских стандартов [32].

Другой причиной разброса полученных экспериментальных значений прочности склеенных образцов при скалывании могут быть внутренние напряжения, существующие в нативной древесине до склеивания [5] и формируемые в процессе склеивания ламелей древесины [23].

Как видно из работ российских исследователей, способом повышения прочности клееных конструкций из сосновых и осиновых ламелей является уплотнение древесины перед склеиванием [4, 14, 22]. При этом в процессе уплотнения часто наблюдается разрушение древесных элементов [22], что нежелательно.

Заключение

Полученные в ходе экспериментальных исследований значения прочности клеевого соединения ламелей из древесины сосны и осины (6,12 МПа)

оказались несколько ниже, чем только из сосны (6,51 МПа), однако они соответствуют ГОСТ 20850–2014. Также показатели близки ранее полученным результатам. При этом отмечается общая закономерность повышения прочности клевого соединения при склеивании ламелей только хвойных пород и незначительное снижение прочности при использовании древесины разных пород.

Подтверждена справедливость выдвинутой гипотезы о возможности склеивания ламелей из древесины разных пород при условии незначимости различий в физико-механических свойствах исходного сырья. С практической точки зрения представляет интерес оценка возможности применения ламелей толщиной до 40 мм, что предполагает проведение отдельного комплекса исследований.

С использованием метода дисперсионного анализа доказано, что прочность клевого шва в клееных конструкциях из древесины осины, а также сосны и осины – отличаются незначимо. В совокупности результаты исследований служат основой для дальнейшей работы по диверсификации сырьевых ресурсов в производстве деревянных клееных конструкций за счет вовлечения в переработку маловостребованной древесины осины, что является актуальным для ряда регионов России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антипов Д.В. Прочность и деформативность клеедеревянной балки с учетом времени, влажности и температуры эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2010. 18 с.

Antipov D.V. *Strength and Deformability of a Glued-Wood Beam, Considering Time, Humidity and Operating Temperature*: Cand. Tech. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 2010. 18 p. (In Russ.).

2. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 224 с.

Ashkenazi E.K. *Anisotropy of Wood and Wood Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost, Publ., 1978. 224 p. (In Russ.).

3. Багаев С.С., Багаев Е.С., Дудин В.А. Об оставлении на корню перестойной осины при проведении сплошных рубок в смешанных древостоях // Лесхоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2016. № 3. С. 107–114. Режим доступа: <http://lhi.vniilm.ru/index.php/ru/bagaev-s-s-bagaev-e-s-dudin-v-a-ob-ostavlenii-na-kornyu-perestojnoj-osiny-pri-provedenii-sploshnykh-rubok-v-smeshannykh-drevostoyakh> (дата обращения: 24.10.23).

Bagaev S.S., Bagaev E.S., Dudin V.A. On Leaving Overmature Aspen at the Root During Clear-Cutting in Mixed Stands. *Lesohozyaistvennaya informaciya: elektronii setevoi jurnal* = Forestry information: electronic online journal, 2016, no. 3, pp. 107–114. (In Russ.).

4. Борисов А.Ю. Совершенствование технологии переработки древесины осины в кровельный материал с учетом природных и производственных условий: дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2017. 153 с.

Borisov A.Yu. *Improving the Technology of Processing Aspen Wood into Roofing Material, Considering Natural and Production Conditions*: Cand. Tech. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2017. 153 p. (In Russ.).

5. Глухих В.Н., Кирютина С.Е., Богданова А.С. Влияние начальных напряжений в древесине на прочность и формоустойчивость деревянных конструкций // Изв. ПГУБС. 2017. № 3. С. 523–531.

Glukhikh V.N., Kiryutina S.E., Bogdanova A.S. The Influence of Primary Stress in Wood on Stiffness and Shape Retention of Timber Constructions. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobscheniya* = Proceedings of Petersburg Transport University, 2017, no. 3, pp. 523–531. (In Russ.).

6. Глухих В.Н., Черных А.Г., Данилов Е.В. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины: моногр. СПб., 2018. 284 с.
- Glukhikh V.N., Chernykh A.G., Danilov E.V. *Wooden Structures Using Claw Washers and Taking Into Account the Initial Stresses of Wood*. Saint Petersburg, 2018. 284 p. (In Russ.).
7. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О. Влияние параметров процесса склеивания древесины на прочность клеевого соединения // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3(39). С. 149–153.
- Eroshkina N.A., Korovkin M.O. Influence of Wood Gluing Process Parameters on Glue Bond Strength. *Sistemi. Metodi. Tehnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2018, vol. 3, iss. 39, pp. 149–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-149-153>
8. Иванов Ю.М., Славик Ю.Ю. Оценка длительной прочности древесины при изгибе по результатам кратковременных испытаний // Изв. вузов. Лесн. журн. 1981. № 2. С. 66–70.
- Ivanov Yu.M., Slavik Yu.Yu. Evaluation of the Long-Term Strength of Wood in Bending According to the Results of Short-Term Tests. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1981, no. 2, pp. 66–70. (In Russ.).
9. Кирюткина С.Е. Совершенствование технологии и повышение эксплуатационной надежности деревянных стеновых конструкций из клееного бруса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2018. 19 с.
- Kiryutina S.E. *Improving the Technology and Increasing the Operational Reliability of Wooden Wall Structures Made of Glued Laminated Timber*: Cand. Tech. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2018. 19 p. (In Russ.).
10. Кузнецова Н.Ф., Сауткина М.Ю. Состояние лесов и динамика их породного состава в Центральном федеральном округе // Лесхоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2019. № 2. С. 25–45. Режим доступа: http://lhi.vniilm.ru/PDF/2019/2/LHI_2019_02-03-Kuznecova.pdf (дата обращения: 24.10.23).
- Kuznetsova N.F., Sautkina M.Yu. Forest State and Dynamics of their Species Composition in the Central Federal District. *Leshozoyaistvennaya informatsiya: elektronnyy setevoy jurnal = Forestry information: electronic online journal*, 2019, no. 2, pp. 25–45. (In Russ.).
11. Леонович О.К., Судникович С.П. Исследование прочностных и теплофизических свойств деревянных строительных конструкций // Тр. БГТУ. № 2. Лесн. и деревооб. пром-сть. 2013. № 2(158). С. 135–137.
- Leonovich O.K., Sudnikovich S.P. Study of Strength, and Thermal Properties of Wooden Building Structures. *Proceedings of BSTU*, 2013, vol. 2, iss.158, pp. 135–137. (In Russ.).
12. Линьков Н.В. К вопросу о методике определения прочностных характеристик клеевых соединений деревянных конструкций // Изв. высш. учебн. заведений. Технология текстил. пром-сти. 2021. № 3(393). С. 153–158.
- Linkov N.V. To the Question of the Method for Determining the Strength Characteristics of Adhesive Joints of Wooden Structures. *Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti = Textile Industry Technology*, 2021, vol. 3, iss. 393, pp. 153–158. (In Russ.). https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_3_153
13. Мазаник Н.В., Божелко И.К. Эксплуатационные характеристики клеев для составных деревянных конструкций // Тр. БГТУ. № 2. Лесн. и деревооб. пром-сть. 2016. № 2(184). С. 136–139.
- Mazanik N.V., Bozhelko I.K. Operating Characteristics of Glues Intended for Combined Wooden Structures. *Proceedings of BSTU*, 2016, vol. 2, iss. 184, pp. 136–139. (In Russ.).
14. Мелехов В.И., Рудная Н.С. Влияние микрорельефа сопрягаемых поверхностей древесины на прочность склеивания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 89–100.
- Melekhov V.I., Rudnaya N.S. The Influence of Wood Surface Microrelief on the Bond Quality. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 6, pp. 89–100. (In Russ.).

15. Овсянников С.И., Шаповалов Д.Ю. Повышение прочности клеевых соединений деревянных конструкций // Вестн. науки и образования Сев.-Зап. России. 2018. Т. 4, № 4. С. 36–41.

Ovsyannikov S.I., Shapovalov D.Yu. Increase in Durability of Glue Connections of Wooden Designs. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* = Journal of Science and Education of North-West Russia, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 36–41. (In Russ.).

16. Онегин В.И., Чубинский А.Н. Промышленное использование древесины осины – эффективное направление устойчивого управления лесами // Зап. Горн. ин-та. 2001. Т. 149. С. 225–227.

Onegin V.I., Chubinskii A.N. Industrial Use of Aspen Wood is an Effective Direction for Sustainable Forest Management. *Zapiski Gornogo instituta* = Journal of Mining Institute, 2001, vol. 149, pp. 225–227. (In Russ.).

17. Попов В.М., Иванов А.В., Латынин А.В., Посметьев В.В. Моделирование процесса формирования внутренних напряжений в клеевых прослойках клееной древесины при воздействии постоянным магнитным полем // Лесотехн. журн. 2011. № 4. С. 47–51.

Popov V.M., Ivanov A.V., Latynin A.V., Posmetiev V.V. Modeling the Process of Formation of Internal Stresses in the Adhesive Interlayers of Glued Wood Under the Influence of a Constant Magnetic Field. *Lesotekhnicheskii jurnal* = Forest Engineering Journal, 2011, no. 4, pp. 47–51. (In Russ.).

18. Рощина С.И. Армирование – эффективное средство повышения надежности и долговечности деревянных конструкций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 71–74.

Roshchina S.I. Reinforcement – Efficient Means of Increasing Reliability and Durability of Wooden Structures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2008, no. 2, pp. 71–74. (In Russ.).

19. Рыкунин С.Н., Кривошечков Н.В. Влияние изменения параметров сосновых пиломатериалов на формирование качества стенового клееного бруса // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 6. С. 50–53.

Rykunin S.N., Krivoshechikov N.V. The Influence of Changing the Parameters of Pine Lumber on the Formation of the Quality of Glued Wall Beams. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.).

20. Серов Е.Н., Лабудин Б.В. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 137–146.

Serov E.N., Labudin B.V. Glued Timbering: Present State and Development Problems. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 2, pp. 137–146. (In Russ.).

21. Титунин А.А. Научные основы получения конкурентоспособных строительных материалов из низкосортной древесины и древесных отходов: дис. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2011. 442 с.

Titunin A.A. *Scientific Bases for Obtaining Competitive Building Materials from Low-Grade Wood and Wood Waste*: Doc. Tech. Sci. Diss. Ivanovo, 2011. 442 p. (In Russ.).

22. Усачева В.Л. Формирование клееных материалов из уплотненной древесины осины: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006. 193 с.

Usacheva V.L. *Formation of Glued Materials from Compacted Aspen Wood*: Cand. Tech. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2006. 193 p. (In Russ.).

23. Фрейдин А.С., Вуба К.Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 223 с.

Freidin A.S., Vuba K.T. *Forecasting the Properties of Adhesive Joints of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1980. 223 p. (In Russ.).

24. Циулин Е.Ю., Шмидт А.Б. Численное моделирование модуля упругости LVL с различным сочетанием взаимно перпендикулярных слоев шпона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 138–148.

Tsiulin E.Yu., Shmidt A.B. Numerical Simulation of LVL Elastic Modulus with Different Combinations of Mutually Perpendicular Veneer Layers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 6, pp. 138–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.138>

25. Шаратов Е.С., Королев А.С., Хисамеева А.Р. Исследование влияния термической обработки древесины сосны (*Pinus sylvestris*) на качество клеевых соединений в клееных деревянных конструкциях // Вестн. КНИТУ. 2014. Т. 17, № 5. С. 38–41.

Sharapov E.S., Korolev A.S., Hisameeva A.R. Study of the Influence of Heat Treatment of Pine Wood (*Pinus sylvestris*) on the Quality of Adhesive Joints in Glued Wooden Structures. *Vestnik kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* = Bulletin of Kazan Technological University, 2014, vol. 17, no. 5, pp. 38–41. (In Russ.).

26. Шереметьева Т.В., Титунин А.А. Обоснование использования осины в производстве деревянных клееных конструкций // Лесн. вестн. 2008. № 6. С. 63–67.

Sheremetyeva T.V., Titunin A.A. Rationale for the Use of Aspen in the Production of Glued Wooden Structures. *Lesnoi vestnik* = Forestry Bulletin, 2008, no. 6, pp. 63–67. (In Russ.).

27. Ярцев В.П., Антипов Д.В. Прочность и долговечность клеедеревянных балок с учетом влажности, температуры и времени эксплуатации // Вестн. ТГТУ. 2011. Т. 17, № 3. С. 780–789.

Yartsev V.P., Antipov D.V. Strength and Durability of Laminated Glued Timbers with Allowance for Humidity, Temperature, and In-Service Time. *Vestnik TSTU* = Bulletin of TSTU, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 780–789. (In Russ.).

28. Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Vanin I.V. Mathematical Modeling of Stress-Strain State of Elements of Joints of Wooden Structures on Glued Fiberglass Washers. *Journal of Physics, Conference Series*, 2021, vol. 2131, art. 032095. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032095>

29. Lukin M.V., Roshchina S.I., Griбанov A.S., Naychuk A.Ya. Stress-strain State of Wooden Beams with External Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012066. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012066>

30. Makomra V., Lissouck R.O., Pommier R., Ngoc A.P., Breysse D., Denaud L., Max L., Ohandja A. Analysis of Drying Stresses in Green-Glued Plywood of Bete (*Mansonia altissima*) Specie. *Journal of Wood Science*, 2020, vol. 66, art. 70. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01911-1>

31. Roshchina S., Lukin M., Lisyatnikov M., Koscheev A. The Phenomenon for the Wood Creep in the Reinforced Glued Wooden Structures. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 245, art. 03020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503020>

32. Rusakov D., Sokolova E., Varankina G., Chubinsky A. Research of Strength of Gluing of Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 574, art. 012070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012070>

33. Sergeev M., Lukina A., Zdravovic N., Reva D. Stress-strain State of a Wood-glued Three-Span Beam with Layer-By-Layer Modification. *Proceedings of MPCPE*, 2021, vol. 182, pp. 485–491. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_43

34. Vital B.R., Maciel A.S., Della Lucia R.M. Quality of Wood Joints Glued with Wood Veneers from Three Trunk Regions of *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* and *Pinus elliottii*. *Revista Árvore*, 2006, vol. 30, iss. 4, pp. 637–644. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000400017>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 57.083.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-162-175

**Культивирование *Dunaliella salina* на питательной среде
из нейтрально-сульфитных щелоков**

Р.А. Иксанов¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4043-6779>

А.В. Канарский¹, д-р техн. наук; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

З.А. Канарская¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

В.М. Гематдинова², канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2777-3842>

Е.В. Белкина³, инж.

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; rishat.iksanov@yandex.com[✉], alb46@mail.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru


²Казанский инновационный университет им. В.Г. Тимирязова, ул. Московская, д. 42, корп. 1, г. Казань, Россия, 420111; venera.nas14@yandex.ru

³ООО «Прикамский картон», ул. Бумажников, д. 1, г. Пермь, Россия, 614037; ekaterina.Belkina@pcbkr.ru

Поступила в редакцию 08.01.23 / Одобрена после рецензирования 16.04.23 / Принята к печати 21.04.23

Аннотация. Установлена эффективность культивирования микроводорослей *Dunaliella salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитных щелоков, полученных при варке целлюлозы из древесины березы, с дополнительным внесением хлорида натрия. Микроводоросли *D. salina* выделены из донного осадка Кояшского озера Керченского полуострова. Показано, что на физиологическую активность микроводорослей влияет количество внесенного в питательную среду хлорида натрия. При добавлении в питательную среду до 5 % хлорида натрия микроводоросли *D. salina* проявляют галотолерантные свойства. С увеличением количества хлорида натрия до 30 % – галофильные свойства. Наилучшие кинетические характеристики роста *D. salina* при культивировании на питательной среде из нейтрально-сульфитных щелоков отмечены при галофильной физиологической активности. Выход биомассы микроводорослей *D. salina* при культивировании на питательной среде из нейтрально-сульфитных щелоков без внесения и при внесении 5 % хлорида натрия выше по сравнению с добавлением 15 и 30 % хлорида натрия. Однако накопление белка имеет противоположную зависимость, в частности, количество белка в культуральной жидкости с 15 и 30 % хлорида натрия больше, чем при содержании хлорида натрия 5 %. С увеличением продолжительности культивирования до 240 ч наблюдается снижение pH питательной среды с 7,04 до 4,70, что обусловлено усвоением микроводорослями минерального и связанного с органическими веществами азота, присутствующего в питательной среде

© Иксанов Р.А., Канарский А.В., Канарская З.А., Гематдинова В.М., Белкина Е.В., 2023

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

из нейтрально-сульфитных щелоков. Установлено, что при культивировании микроводоросли ассимилируют как редуцирующие, так и красящие вещества, присутствующие в питательной среде, следствием является интенсивный рост клеток. При увеличении продолжительности культивирования микроводорослей наблюдается рост числа клеток в культуральной жидкости до $4 \cdot 10^6$ кл./мл, при этом они синтезируют внеклеточный фермент ксиланазу, что способствует дополнительному образованию редуцирующих веществ в питательной среде за счет ферментативного гидролиза ксилана. Результаты исследований показывают перспективность использования нейтрально-сульфитных щелоков в биотехнологии при культивировании микроводорослей *D. salina* для получения биопродуктов.

Ключевые слова: нейтрально-сульфитный щелок, галофилы, микроводоросли *Dunaliella salina*, физиологическая активность, кинетические характеристики роста, выход биомассы, белок

Для цитирования: Иксанов Р.А., Канарский А.В., Канарская З.А., Гематдинова В.М., Белкина Е.В. Культивирование *Dunaliella salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитных щелоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 162–175. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-162-175>

Original article

Cultivation of *Dunaliella salina* Microalgae in the Nutrient Medium from Neutral-Sulfite Alkalis

Rishat A. Iksanov[✉], Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4043-6779>

Albert V. Kanarsky¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [O-8113-2016](https://orcid.org/0000-0002-3541-2588),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

Zosya A. Kanarskaya¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAG-2997-2020](https://orcid.org/0000-0002-8194-6185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8194-6185>

Venera M. Gematdinova², Candidate of Engineering;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2777-3842>

Ekaterina V. Belkina³, Engineer

¹Kazan National Research Technological University, ul. Karl Marx, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; rishat.iksanov@yandex.com[✉], alb46@mail.ru, zosya_kanarskaya@mail.ru

²Kazan Innovation University named after V.G. Timiryasov, ul. Moscovskaya, 42, Kazan, 420111, Russian Federation; venera.nas14@yandex.ru

³ООО “Prikamsky cardboard”, ul. Bumazhnikov, 1, Perm, 614037, Russian Federation; ekaterina.Belkina@pcbkr.ru

Received on January 8, 2023 / Approved after reviewing on April 16, 2023 / Accepted on April 21, 2023

Abstract. The effectiveness of cultivation of microalgae *Dunaliella salina* in the nutrient medium from neutral-sulfite alkalis obtained during the production of cellulose from birch wood, with additional sodium chloride addition was established. *D. salina* microalgae were isolated from the bottom sediment of the Koyash Lake of the Kerch Peninsula. It was shown that the physiological activity of microalgae was affected by the amount of sodium chloride introduced into the nutrient medium. When up to 5 % sodium chloride is added

to the nutrient medium. *D. salina* microalgae exhibit halotolerant properties when up to 5 % of sodium chloride is added to the nutrient medium. With an increase in the amount of sodium chloride introduced up to 30 %, *D. salina* culture exhibits halophilic properties. The best kinetic characteristics of the growth of *D. salina* when cultivated in the nutrient medium from neutral sulfite alkalis were observed at halophilic physiological activity. The yield of biomass of *D. salina* microalgae when cultivated in the nutrient medium without and when 5 % sodium chloride was added to the nutrient medium from neutral-sulfite alkalis is higher compared to the addition of 15 and 30 % sodium chloride to the nutrient medium. However, the accumulation of protein has an opposite dependence, in particular, the protein content of the culture fluid, in which 15 and 30 % sodium chloride was applied is higher than that when 5 % sodium chloride was applied. With an increase in the duration of cultivation up to 240 hours, a decrease in the pH of the nutrient medium from 7.04 to 4.70 was observed, this was due to the assimilation by microalgae of mineral and organic-bound nitrogen present in the nutrient medium from neutral-sulfite alkalis. It was established that during cultivation microalgae assimilate both reducing substances and coloring substances present in the nutrient medium, which results in intensive cell growth. With an increase in the duration of cultivation of microalgae, an increase in the number of cells in the culture fluid to $4 \cdot 10^6$ cl/ml was observed, which at the same time synthesize the extracellular enzyme xylanase, which contributes to the additional formation of reducing substances in the nutrient medium due to the enzymatic hydrolysis of xylan. The obtained research results show the prospects of using neutral-sulfite alkalis in biotechnology in the cultivation of *D. salina* microalgae for the production of biological products.

Keywords: neutral-sulfite liquor, halophiles, *Dunaliella salina* microalgae, physiological activity, kinetic characteristics of growth, biomass yield, protein

For citation: Iksanov R.A., Kanarsky A.V., Kanarskaya Z.A., Gematdinova V.M. Cultivation of *Dunaliella salina* Microalgae in the Nutrient Medium from Neutral-Sulfite Alkalis. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 162–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-162-175>

Введение

На предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности при производстве целлюлозы, бумаги, картона и других видов продукции образуются вторичные ресурсы переработки древесины, различающиеся по физико-химическим свойствам. Значительное количество вторичных ресурсов в растворенном состоянии аккумулируется в технологических средах: в варочных и отбельных растворах, а также в концентрированных промывных водах. Состав веществ, попадающих в технологические среды, разнообразен и зависит от вида используемого древесного сырья, способов получения волокнистых полуфабрикатов и изготовления из них конечных продуктов. Химическая и гидробаротермическая обработка древесного сырья и волокнистых полуфабрикатов сопровождается растворением компонентов древесины в технологических средах. Дальнейшее разделение волокнистых полуфабрикатов и компонентов древесины ведет к образованию щелоков, а многократное использование промывной воды обуславливает концентрирование в них веществ в виде высокодисперсной клетчатки и растворенных высокомолекулярных и низкомолекулярных органических и минеральных веществ [1].

Технологические среды целлюлозных производств содержат олиго- и моносахариды (ксиланы, маннаны, маннозы, галактаны), органические кислоты,

фурфурол, смолы и т. п. Эти среды окрашены в коричневый, желтоватый или серовато-коричневый цвета, что объясняется присутствием в них растворенных фрагментов лигнина.

Неорганические вещества в технологических средах также разнообразны, их состав определяется минеральными веществами, присутствующими в древесине, и химическими реагентами, применяемыми для получения волокнистых полуфабрикатов (преимущественно это соединения натрия, серы и хлора) [2].

Использование вторичных ресурсов, содержащихся в жидких технологических средах (щелоках сульфат-целлюлозного производства), сводится к термической регенерации химикатов и сжиганию органических веществ с получением тепловой энергии, что экономически оправдано. Из сульфитных, бисульфитных и нейтрально-сульфитных щелоков получают лигносульфонаты. Углеводы сульфитных щелоков используют в качестве субстратов при производстве кормовых дрожжей, этанола. В этом случае требуется предварительная подготовка щелоков к биохимической переработке, которая заключается в удалении из среды веществ, отрицательно влияющих на жизнедеятельность микроорганизмов. Исследуется возможность комплексной биохимической переработки бисульфитных и нейтрально-сульфитных щелоков с получением кормового белка и молочной кислоты [3]. Однако для реализации такой технологии также необходима предварительная подготовка щелоков с превращением их в безопасные для микроорганизмов субстраты, что увеличивает затраты на организацию производства биопродуктов. В этой связи целесообразен поиск микроорганизмов, способных адаптироваться к веществам, присутствующим в щелоках (без предварительной обработки), и синтезировать необходимые биопродукты [4].

Анализ публикаций позволяет сделать вывод об интересе ученых и инженеров к использованию в биотехнологии микроорганизмов, обладающих галофильными свойствами [5]. Галофильные микроорганизмы способствуют биодеградации некоторых опасных органических и неорганических соединений как в аэробных, так и в анаэробных условиях [6, 7, 9, 10]. Сточные воды, содержащие высокие концентрации данных соединений, обрабатываются этими бактериями в гиперсалиновых средах. Биоремедиация тяжелых металлов, таких как кадмий, ртуть, мышьяк и т. д., из сточных вод осуществляется галофильными бактериями. Соединения, например фенол, формальдегид, фосфорорганические и др., успешно разлагаются галофильными бактериями, включая представителей семейств Halomonadaceae, *Marinobacter hydrocarbonoclasticus*, которые разлагают нефтяные углеводороды в солевых условиях и зарекомендовали себя как деструкторы углеводородов [11]. Ввиду своих особенностей многие галофильные организмы могут использоваться для очистки сточных вод, т. к. данные среды имеют достаточную соленость, содержат различные органические кислоты и пентозные сахара. Предполагается, что галофилы можно применять в устойчивых биоэнергетических технологиях для преодоления ожидаемой нехватки нефти и проблем, связанных с глобальным потеплением [12, 22].

Исследователи обращают внимание на микроводоросли *Dunaliella salina*, которые рекомендуется использовать в различных отраслях промышленности

для переработки вторичных ресурсов производства [12]. Свойство микроводорослей *D. salina* существовать в средах с высокой концентрацией органических соединений и способность удалять токсичные продукты производства из сточных вод обуславливают перспективность данного вида для применения при получении ферментов в целях дальнейшего использования в биотехнологии. Показано, что микроводоросли *D. salina* синтезируют β -каротиноиды при культивировании на дешевых питательных средах, приготовленных из вторичных ресурсов фармацевтической промышленности, производства красителей, пищевых добавок и т. д. [13]. Микроводоросли *D. salina* возможно использовать в качестве индикатора различных токсичных соединений, находящихся в кормовых продуктах. Ввиду чувствительности данных микроорганизмов к оксидам металлов, отравляющим компонентам, микроводоросли *D. salina* позволяют контролировать загрязнение воздушного пространства [14, 15]. В некоторых работах указано, что в результате химических реакций друг с другом микроводоросли способны реагировать с различными штаммами микроорганизмов для синтеза фосфорных соединений. Данным симбиозом можно ускорить вывод токсичных элементов в средах для обеспечения образования нитратов и сокращение химического потребления кислорода. Благодаря осмотическим свойствам микроорганизмы *D. salina* способны выдерживать экстремальные условия существования и синтезировать такое вещество, как гидроксипутират [8, 16–19].

Цель – рассмотрение возможности культивирования микроводорослей *D. salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока.

Для достижения поставленной цели было определено влияние внесенного хлорида натрия и температуры культивирования:

на усвоение углеводов нейтрально-сульфитного щелока микроводорослями *D. salina*;

на кинетические параметры роста микроводорослей *D. salina* при культивировании на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока;

на синтез биомассы и белка при культивировании *D. salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования были микроводоросли *D. salina*, выделенные из донных осадков Кояшского озера Керченского полуострова. Пробу отбирали во время цветения поверхности озера красным цветом. Для анализа использовали культуру, по фенотипическим признакам соответствующую колонии микроводоросли *D. salina*: форма – круглая, цвет – желто-оранжевый, поверхность – гладкая, непрозрачная, профиль – плоский, край – гладкий. Культивирование микроводорослей на питательной среде Гисса показало, что выделенная из донного осадка культура имеет сахаролитическую активность.

Для приготовления питательной среды использовали нейтрально-сульфитный щелок, образующийся при получении целлюлозы высокого выхода (55 %) из березы. Нейтрально-сульфитный щелок имел следующие характеристики: сухих веществ – 9,4 %; взвешенных веществ – 1000 мг/л; редуцирующих веществ (РВ) – 5,3 %; зольность – 27,4 %; рН – 5,3±0,2; сера в органическом

соединении, лигнин и лигносульфонаты – 2,58; 16,00 и 45,00 % в пересчете на сухое вещество соответственно; остаточное содержание SO_2 – 24,16 г/л в ед. SO_2 . Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии определен углеводный состав нейтрально-сульфитного щелока (г/л):

Арабиноза.....	1,21±0,12
β-дезоксиглюкоза.....	0,58±0,06
Целлобиоза.....	61,14±6,11
Фруктоза.....	9,04±0,90
Галактоза.....	2,02±0,20
Глюкоза.....	5,21±0,52
Рамноза.....	1,07±0,11
Ксилоза.....	3,14±0,31
Манноза.....	менее 0,1

В питательную среду для культивирования микроводорослей дополнительно вносили хлорид натрия в количестве 5, 10, 15 и 30 % по отношению к общей массе нейтрально-сульфитного щелока. Для сравнения использовали питательную среду без хлорида натрия.

Непрерывное культивирование микроводорослей проводили на водном шейкере New Brunswick Scientific Innova 3100/C76 (США), варьируя температуру от 15 до 35 °С, при 140 об./мин в помещении с повторно-кратковременной освещенностью 300 лм/м² в течение 12 ч и 12-часовым отсутствием освещения.

Физиологическую активность культивируемых микроводорослей контролировали: по изменению оптической плотности культуральной жидкости, измеренной на фотометре КФК-2 при длине волны 540 нм; путем определения количества клеток в соответствии с принятой в микробиологии методикой; по изменению рН, потреблению РВ и накоплению биомассы. Определение рН культуральной жидкости проводили на приборе рН-150МИ (Россия). Подсчет количества клеток – на микроскопе Olympus CX43 (Япония) с использованием счетной камеры Горяева. Установление содержания восстанавливающих сахаров (РВ) – по методике [20]. Расчет кинетических характеристик роста микроводорослей – по принятой в микробиотехнологии методике [21]. Ксиланазную активность определяли стандартным методом [23]. Выход синтезируемой биомассы – взвешиванием осадка, выделенного из культуральной жидкости центрифугированием при 8000 об./мин в течение 15 мин и последующей сушкой. Содержание белка устанавливали методом Бредфорда по ГОСТ 31488–2012 «Препараты ферментные. Методы определения ферментативной активности ксиланазы» с использованием спектрофотометра Tecaninfinite M200 Pro (Австрия) при длине волны 595 нм.

Полученные экспериментальные результаты обрабатывали в программе Microsoft Excel (версия 15.05.05501.1000).

Результаты исследования и их обсуждение

Предварительные исследования с внесением 10 % хлорида натрия в питательную среду из нейтрально-сульфитного щелока при продолжительности культивирования 240 ч показали, что температура культивирования микрово-

дорослей влияет на содержание РВ, оптическую плотность (A) и рН культуральной жидкости (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние температуры культивирования на содержание РВ,
 A и рН культивируемой жидкости**
**The effect of cultivation temperature on the РВ, optical density and рН
of the cultivated liquid**

Показатель	Температура культивирования, °С				
	15	20	25	30	35
РВ, %	0,62	0,38	0,48	0,38	0,29
A	0,45	0,58	0,44	0,56	0,53
рН	6,09	6,00	6,27	6,93	6,94

При внесении хлорида натрия в питательную среду и с ростом температуры культивирования увеличивается потребление микроводорослями РВ, повышаются оптическая плотность и рН культуральной жидкости.

При варьировании температуры глубинного культивирования микроводорослей от 15 до 35 °С при внесении 10 % хлорида натрия в питательную среду из нейтрально-сульфитного щелока и продолжительности культивирования 240 ч установлено, что увеличение температуры культивирования благоприятно влияет на ростовые характеристики культуры *D. salina* (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние температуры культивирования на удельную скорость роста
и продолжительность генерации клеток микроводорослей *D. salina***
**The effect of the cultivation temperature on the specific growth rate
and cell generation time of *D. salina* microalgae cells**

Температура культивирования, °С	Удельная скорость роста культуры, ч ⁻¹	Продолжительность деления (генерации) клетки, ч
5	0,01	6,93
10	0,01	6,93
15	0,07	9,91
25	0,71	1,36
30	0,36	1,93

Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что при внесении 10 % хлорида натрия в питательную среду из нейтрально-сульфитного щелока и с увеличением температуры культивирования повышается удельная скорость роста культуры и снижается продолжительность генерации клеток. При этом, согласно полученным результатам, благоприятной температурой культивирования микроводорослей *D. salina* является 25 °С.

Дальнейшее определение взаимного влияния продолжительности культивирования и количества внесенного хлорида натрия на эффективность культивирования микроводорослей *D. salina* на питательной среде, приготовленной из нейтрально-сульфитного щелока, проводили при температуре 25 °С.

На рис. 1 представлены результаты, отражающие влияние внесения хлорида натрия и продолжительности культивирования микроводорослей *D. salina* на питательной среде, приготовленной из нейтрально-сульфитного щелока, на рН культуральной жидкости. С увеличением продолжительности культивирования до 384 ч наблюдается снижение рН питательной среды и усвоение микроводорослями минерального и связанного с органическими веществами азота, присутствующего в питательной среде. Изменение рН среды связано с осмотическими свойствами микроорганизмов *D. salina*: их клетки выделяют кислотные соединения для создания пленки, препятствующей воздействию молекул NaCl на жизнеобеспечение организмов. Стоит также упомянуть, что чем больше концентрация NaCl в среде, тем более значительно изменяется ее рН, как видно на рис. 1, где рН для среды с концентрацией хлорида натрия 30 % снизилось с 5,32 до 4,90. Влияние содержания солей в питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока и продолжительности культивирования микроводорослей на рН описывается параболой с максимумом 6,05, что совпадает с графическим значением рассматриваемого показателя при продолжительности культивирования 96 и 144 ч.

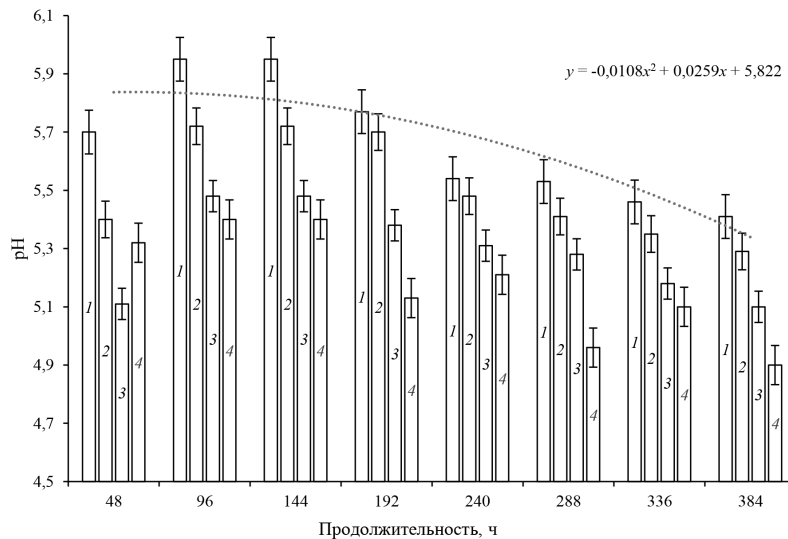


Рис. 1. Влияние внесения 0 (1), 5 (2), 15 (3) и 30 (4) % хлорида натрия и продолжительности культивирования *D. salina* на рН питательной среды из нейтрально-сульфитного щелока

Fig. 1. The effect of 0 (1), 5 (2), 15 (3) and 30 (4) % sodium chloride application and duration of *D. salina* cultivation on the pH of neutral-sulfite alkaline nutrient medium

Оптическая плотность культуральной жидкости на отрезке культивирования микроводоросли до 240 ч снижается, что обусловлено ассимилированием микроводорослями окрашенных веществ, присутствующих в питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока (рис. 2). В этот период культивирования наблюдается потребление микроводорослями РВ (рис. 3) и интенсивный рост микроводорослей, что подтверждается результатами определения количества клеток, представленными на рис. 4. При увеличении продолжительности культивирования микроводорослей более 240 ч наблюдается рост оптической плот-

ности культуральной жидкости, что, видимо, связано с продолжением роста микроводорослей и выделением внеклеточных белковых веществ, в частности ферментов, гидролизующих углеводы.

На биокаталитические реакции гидролиза углеводов в питательной среде ферментами, выделяемыми микроводорослями, указывает рост концентрации РВ в культуральной жидкости (рис. 3).

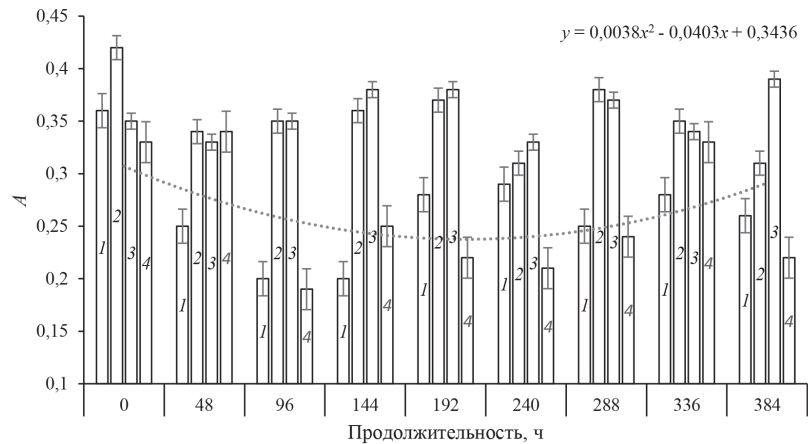


Рис. 2. Влияние количества внесенного хлорида натрия и продолжительности культивирования *D. salina* на оптическую плотность питательной среды из нейтрально-сульфитного щелока (условные обозначения 1–4 те же, что на рис. 1)

Fig. 2. The effect of the amount of added sodium chloride and duration of *D. salina* cultivation on the optical density of neutral-sulfite alkalis nutrient medium (symbols 1–4 are the same as in Fig. 1)

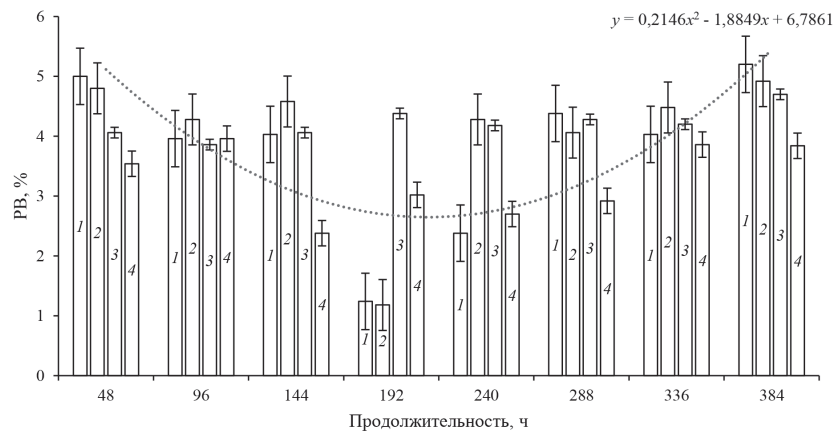


Рис. 3. Влияние количества внесенного хлорида натрия и продолжительности культивирования *D. salina* на содержание РВ в питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока (условные обозначения 1–4 те же, что на рис. 1)

Fig. 3. The effect of the amount of added sodium chloride and duration of cultivation of *D. salina* on the content of RW in nutrient medium from neutral-sulfite alkalis (symbols 1–4 are the same as in Fig. 1)

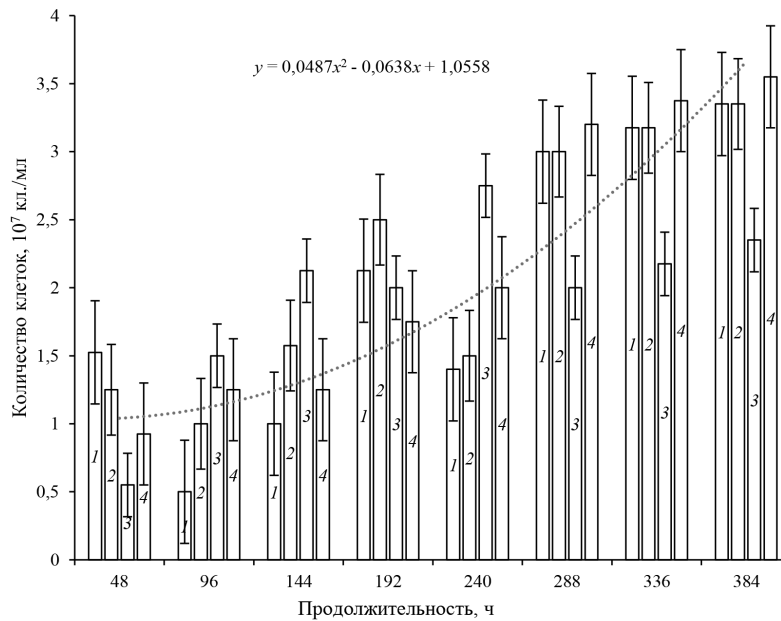


Рис. 4. Влияние количества внесенного хлорида натрия и продолжительности культивирования *D. salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока на количество клеток в культуральной жидкости (условные обозначения 1–4 те же, что на рис. 1)

Fig. 4. The effect of the amount of added sodium chloride and duration of cultivation of *D. salina* on neutral-sulfite alkalis nutrient medium on the number of cells in the culture fluid (symbols 1–4 are the same as in Fig. 1)

Взаимное влияние содержания солей в питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока и продолжительности культивирования микроводорослей на оптическую плотность, количество РВ и синтез клеток описывается полиномиальными зависимостями, имеющими минимальные и максимальные значения этих показателей при продолжительности культивирования 96 и 384 ч.

Расчеты показывают, что на удельную скорость роста культуры и продолжительность деления клеток оказывает влияние содержание хлорида натрия, внесенного в питательную среду (табл. 3). Однако, как видно из представленных результатов, культура растет на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока и без внесения хлорида натрия. Скорее всего, присутствие хлорида натрия в нейтрально-сульфитном щелоке положительно сказывается на жизнедеятельности микроводорослей *D. salina*. При этом рассматриваемая культура проявляет галотолерантные свойства без внесения и с внесением 5 % хлорида натрия в питательную среду. С увеличением содержания хлорида натрия в питательной среде культура *D. salina* проявляет галофильные свойства. При этом внесение 15 % хлорида натрия вызывает снижение удельной скорости роста и увеличение продолжительности генерации клеток. Улучшению кинетических характеристик культуры способствует повышение содержания хлорида натрия в питательной среде до 30 %, что приводит к переходу культуры от галотолерантной к галофильной физиологической активности. Однако наилучшие кинетические характеристики роста культуры *D. salina* проявляются при галотолерантной физиологической активности.

Таблица 3

Влияние количества внесенного хлорида натрия на удельную скорость роста и продолжительность генерации *D. salina* при культивировании на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока

The effect of the amount of sodium chloride added on the specific growth rate and generation time of *D. salina* when cultured in the neutral-sulfite alkalis nutrient medium

Количество хлорида натрия, %	Удельная скорость роста культуры, ч ⁻¹	Продолжительность деления (генерации) клетки, ч
0	0,03	23,10
5	0,09	29,65
15	0,20	3,47
30	0,50	1,38

Следует отметить, что выход биомассы микроводорослей *D. salina* при культивировании на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока без внесения и при внесении в нее 5 % хлорида натрия ниже по сравнению с внесением 15 и 30 % хлорида натрия, как и содержание белка в культуральной жидкости с 5 % хлорида натрия меньше по сравнению с содержанием белка в культуральной жидкости, в которую добавляли 15 % хлорида натрия (табл. 4).

Таблица 4

Влияние количества внесенного хлорида натрия на выход биомассы и синтез белка при культивировании *D. salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока

The effect of the amount of added sodium chloride concentration on biomass yield and protein synthesis during cultivation of *D. salina* in the neutral-sulfite alkalis nutrient medium

Количество хлорида натрия, %	Выход биомассы, %	Содержание белка, мг/мл
0	28	0,30
5	31	0,29
15	48	0,66
30	50	0,97

Выше было показано, что при увеличении продолжительности культивирования микроводорослей *D. salina* более 240 ч в питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока наблюдается увеличение концентрации РВ. Видимо, это обусловлено прежде всего присутствием в культуральной жидкости специфических белков, в частности ферментов. Это подтверждается определением ксиланазной активности культуральной жидкости после окончания культивирования микроводорослей: при внесении в питательную среду хлорида натрия в количестве 0, 5, 15 и 30 % ксиланазная активность соответственно равна 1,2; 2,0; 1,6 и 4,0 ед./мл.

Заключение

Внесение хлорида натрия в питательную среду из нейтрально-сульфитных щелоков влияет на физиологическую активность микроводорослей *Dunaliella salina*. При этом создание условий для проявления культурой *D. salina* галофильных свойств предпочтительней, т. к. при культивировании в этом случае выше удельная скорость роста культуры, меньше продолжительность генерации клеток и больше выход биомассы по сравнению с вариантом проявления этой культурой галофильных свойств.

Культивирование микроводорослей *D. salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитного щелока сопровождается ассимилированием углерода окрашенных веществ и углеводов, что способствует увеличению числа клеток в культуральной жидкости, которые необходимо контролировать подсчетом. Косвенный метод оценки количества клеток по оптической плотности культуральной жидкости непригоден в связи с присутствием окрашенных веществ, которые усваиваются микроводорослями.

При культивировании на питательной среде из нейтрально-сульфитных щелоков микроводоросли *D. salina* синтезируют фермент ксиланазу, которая гидролизует ксиланы, что способствует образованию редуцирующих веществ в культуральной жидкости. Результаты исследований показывают возможность утилизации органических веществ из нейтрально-сульфитных щелоков с получением белковых продуктов.

Таким образом, использование нейтрально-сульфитных щелоков в биотехнологии при культивировании микроводорослей *D. salina* для получения биопродуктов является перспективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бадикова А.Д., Куляшова И.Н., Кудашева Ф.Х. Лигносulfонаты нейтрально-сульфитного способа варки как перспективное сырье для получения буровых реагентов // Башк. хим. журн. 2014. Т. 21, № 1. С. 64–66.

Badikova A.D., Kulyashova I.N., Kudasheva F.H. Lignosulfonates of the Neutral-Sulfite Cooking Method as a Promising Raw Material for the Production of Drilling Reagents. *Bashkir Chemical Journal*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 64–66. (In Russ.).

2. Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Миронов Д.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть I // Лесн. вестн. 2022. Т. 26, № 1. С. 97–113.

Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Mironov D.A. Wood as a Chemical Raw Material. History and Modernity. IV. Delignification of Wood as a Way to Obtain Cellulose. Part I. *Forest Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 97–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-1-97-113>

3. Смирнова Е.Г., Лоцманова Е.М., Журавлева Н.М., Резник А.С., Вураско А.В., Дриккер Б.Н., Минакова А.Р., Симонова Е.И., Сиваков В.П., Первова И.Г., Маслакова Т.И., Казаков Я.В., Севастьянова Ю.В., Коптяев В.В., Дернова Е.В., Канарский А.В., Дулькин Д.А., Щербак Н.В., Дубовый В.К. Материалы из нетрадиционных видов волокон: технологии получения, свойства, перспективы применения: моногр. / под ред. А.В. Вураско. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 252 с.

Smirnova E.G., Lotsmanova E.M., Zhuravleva N.M., Reznik A.S., Vurasko A.V., Driker B.N., Minakova A.R., Simonova E.I., Sivakov V.P., Pervova I.G., Maslakova T.I., Kazakov Ya.V., Sevastyanova Yu.V., Koptyaev V.V., Dernova E.V., Kanarsky A.V., Dulkan D.A., Sherbak N.V., Dubovy V.K. *Materials from Non-Traditional Types of Fibers: Technologies of Production, Properties, Prospects of Application: Monograph*. Yekaterinburg, Ural State Forestry University, 2020. 252 p. (In Russ.).

4. Чакчир Б.А., Алексеева Г.М. Фотометрические методы анализа: метод. указ. СПб.: СПХФА, 2002. 44 с.

Chakchir B.A., Alekseeva G.M. *Photometric Methods of Analysis: Methodological Guidelines*. Saint Petersburg, SPCPU Publ., 2002. 44 p. (In Russ.).

5. Beardall J., Giordano M. Acquisition and Metabolism of Inorganic Nutrients by *Dunaliella*. *The Alga Dunaliella: Biodiversity, Physiology, Genomics and Biotechnology*. New Hampshire, Science Publ., 2019, pp. 73–187. <https://doi.org/10.1201/b10300-8>

6. Benemann J.R. Opportunities and Challenges in Algae Biofuels Production. *A Position Paper in line with Algae World 2008*, 2008. 15 p.

7. Brennan L., Owende P. Biofuels from Microalgae – a Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, iss. 2, pp. 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>

8. Engstrand P., Sundberg C., Wancke-Stahl C., Jonsson J., Starck G., Wahlgren M. Method of Producing Bleached Thermomechanical Pulp (Tmp) or Bleached Chemithermomechanical Pulp (Ctmp), Patent US, no. US 2004/0231811 A1.

9. Fan J., Huang J., Li Y., Han F., Wang J., Li X., Wang W. Sequential Heterotrophy Dilution Photoinduction Cultivation for Efficient Microalgal Biomass and Lipid Production. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 112, pp. 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.046>

10. Ferraz A., Guerra A., Souza-Cruz P.B., Mendonca R. Attempts to Correlate Biopulping Benefits with Changes in the Chemical Structure of Wood Components and Enzymes Produced during the Wood Biotreatment with *Ceriporiopsis subvermispora*. *Progress in Biotechnology*, 2002, vol. 21, pp. 73–80. [https://doi.org/10.1016/S0921-0423\(02\)80009-0](https://doi.org/10.1016/S0921-0423(02)80009-0)

11. Huang C., Wu H., Li R., Zong M. Improving Lipid Production from Bagasse Hydrolysate with *Trichosporon* Fermentans by Response Surface Methodology. *New Biotechnology*, 2012, vol. 29, iss. 3, pp. 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2011.03.008>

12. Kielkopf C.L., Bauer W.J., Urbatsch I.L. Methods for Measuring the Concentrations of Proteins. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2020, vol. 4, art. 102277. <https://doi.org/10.1101/pdb.top102277>

13. Kitto M.R., Rengunathan C. Is Earthen Unmixed Pond Culture Technology for *Dunaliella*, the only Way to Beat High Natural β -Carotene Prices? *Engormix*, 2012.

14. Konwar L.J., Mikkola J.P., Bordoloi N., Saikia R., Chutia R.S., Katak R. Sidestreams from Bioenergy and Biorefinery Complexes as a Resource for Circular Bioeconomy. *Waste Biorefinery*, 2018, pp. 85–125. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00003-3>

15. Madhuri P., Keerthana R. Effect of Pulping, Bleaching and Refining Process on Fibers for Papermaking. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2020, vol. 9, iss. 12, pp. 330–316.

16. Maier R.M. *Bacterial Growth. Environmental Microbiology*. Burlington, San Diego, London, Elsevier Publ., 2009, pp. 37–54. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370519-8.00003-1>

17. Mboowa D.A. Review of the Traditional Pulping Methods and the Recent Improvements in the Pulping Processes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, vol. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01243-6>

18. Michaela W., Janina G., Bettina L., Raimund T., Christoph H., Hedda K. Weber Generation of PHB from Spent Sulfite Liquor Using Halophilic Microorganisms. *Microorganisms*, 2015, vol. 3, iss. 2, pp. 268–289. <https://doi.org/10.3390/microorganisms3020268>
19. Orata F. Derivatization Reactions and Reagents for Gas Chromatography Analysis. *Advanced Gas Chromatography – Progress in Agricultural, Biomedical and Industrial Applications*, 2012, pp. 83–108. <https://doi.org/10.5772/33098>
20. Perez-Garcia O., Escalante F.M.E., De-Bashan L.E., Bashan Y. Heterotrophic Cultures of Microalgae: Metabolism and Potential Products. *Water Research*, 2011, vol. 45, iss. 1, pp. 11–36. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.037>
21. Rathinam R., Chinnathambi A., Ganesan V. Efficacy of *Dunaliella salina* (Volvocales, Chlorophyta) in Salt Refinery Effluent Treatment. *Asian Journal of Chemistry*, 2004, vol. 16, iss. 2, pp. 1081–1088.
22. Rullifank K.F., Roefinal M.E., Kostanti M., Sartika L. Evelyn Pulp, and Paper Industry: an Overview on Pulping Technologies, Factors, and Challenges. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 845, art. 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/845/1/012005>
23. Tafreshi H.A., Shariati M. *Dunaliella* Biotechnology: Methods and Applications. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, vol. 107, iss. 1, pp. 14–35. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04153.x>

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

Научная статья

УДК 663.18:661.728

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-176-189

Влияние топологической структуры целлюлозы на процессы ацетилирования и нитрования

К.С. Вашукова¹✉, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [G-1760-2019](https://orcid.org/0000-0002-7916-2410),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-2410>

К.Ю. Терентьев¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-1755-2016](https://orcid.org/0000-0002-4042-7864),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4042-7864>

Д.Г. Чухчин¹, канд. техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-9487-2015](https://orcid.org/0000-0003-3250-8469),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

А.Д. Ивахнов¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>

Д.Н. Пошина², канд. техн. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [E-8413-2017](https://orcid.org/0000-0001-5342-0605),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-0605>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; k.bolotova@narfu.ru✉, k.terentev@narfu.ru, dimatsch@mail.ru, a.ivahnov@narfu.ru

²Институт высокомолекулярных соединений РАН, Большой просп. Васильевского острова, д. 31, Санкт-Петербург, Россия, 199004; poschin@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.11.22 / Одобрена после рецензирования 18.02.23 / Принята к печати 23.02.23

Аннотация. Эфиры целлюлозы активно используются при изготовлении новых полуфабрикатов, препаратов и материалов. Растительное сырье является основным источником для получения производных целлюлозы. Перспективным становится также производство целлюлозы путем микробиологического синтеза. Несмотря на одинаковые пути биосинтеза микрофибрилл, образцы целлюлозы растительного и бактериального происхождения отличаются по ряду структурных особенностей. Цель работы – оценка влияния топологической структуры целлюлозы растительного и бактериального происхождения на процессы ацетилирования и нитрования. В качестве образцов растительной целлюлозы использовали хлопковую и сульфатную целлюлозу. Бактериальную целлюлозу получали в лаборатории с применением смешанного сообщества микроорганизмов в статических условиях на синтетических глюкозных средах. Нитрование целлюлозы проводили смесью концентрированных H_2SO_4 и HNO_3 . Содержание азота в полученных образцах определяли ферросульфатным методом. ИК-спектры нитратов целлюлозы регистрировали на инфракрасном фурье-спектрометре Vertex-70 в диапазоне волновых чисел $4000 \dots 400 \text{ см}^{-1}$. Ацетилирование целлюлозы осуществляли в среде сверхкритического диоксида углерода в системе сверхкритической флюидной экстракции SFE-5000, Thar Process. В ацетате целлюлозы титриметрически определяли содержание связанной уксусной кислоты, после чего рассчитывали степень замещения. Посредством электронной и атомно-силовой микроскопии визуализированы волокна растительной целлюлозы и фибриллы бактериальной целлюлозы. Выход нитрата из чистой хлопковой целлюлозы составил 160 %, т. е. степень замещения – 2,20. Нитрат целлюлозы, полученный из бактериальной целлюлозы в аналогичных условиях, имел степень замещения 1,96. Предложен новый метод прямого ацетилирования лиофильно

© Вашукова К.С., Терентьев К.Ю., Чухчин Д.Г., Ивахнов А.Д., Пошина Д.Н., 2023

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

высушенных препаратов бактериальной целлюлозы в среде сверхкритического диоксида углерода, что позволяет осуществлять процесс без кислотного катализатора и при пониженном расходе ацетилирующего агента. Ацетилирование растительной сульфатной целлюлозы показало степень замещения 2,40, для бактериальной целлюлозы – выход диацетилцеллюлозы с содержанием ацетильных групп 50 %, что соответствует степени замещения 2,10. Получение эфиров обусловлено как топохимическими особенностями микрофибрилл, так и кристалличностью материала.

Ключевые слова: волокна целлюлозы, ацетат целлюлозы, нитрат целлюлозы, бактериальная целлюлоза, растительная целлюлоза, эфиры целлюлозы

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-04-00457 с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» САФУ им. М.В. Ломоносова, сверхкритические обработки выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSRU-2021-0009).

Для цитирования: Вашукова К.С., Терентьев К.Ю., Чухчин Д.Г., Ивахнов А.Д., Пошина Д.Н. Влияние топологической структуры целлюлозы на процессы ацетилирования и нитрования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 176–189. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-176-189>

Original article

Effect of Topological Structure of Cellulose on the Processes of Acetylation and Nitration

Ksenia S. Vashukova¹✉, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-1760-2019](https://orcid.org/0000-0002-7916-2410), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-2410>

Konstantin Y. Terentyev¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-1755-2016](https://orcid.org/0000-0002-4042-7864), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4042-7864>

Dmitry G. Chukhchin¹, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9487-2015](https://orcid.org/0000-0003-3250-8469),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

Artem D. Ivakhnov¹, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>

Daria N. Poshina², Candidate of Engineering, Research Scientist;

ResearcherID: [E-8413-2017](https://orcid.org/0000-0001-5342-0605), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-0605>

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

²Institute of Macromolecular Compounds of the Russian Academy of Sciences, Bolshoy pr., 31, Saint-Petersburg, 199004, Russian Federation; poschin@yandex.ru

Received on November 22, 2022 / Approved after reviewing on February 18, 2023 / Accepted on February 23, 2023

Abstract. Cellulose esters are actively used in the production of new by-products, drugs, and materials. Plant raw materials are the main source for the production of cellulose derivatives. The production of cellulose by microbial synthesis is also becoming promising. Despite similar pathways of microfibril biosynthesis, cellulose samples of plant and bacterial origin differ in a number of structural features. The aim of this work is to evaluate the influence of the topological structure of cellulose of plant and bacterial origin on the acetylation and nitration processes.

Cotton and kraft cellulose were used as samples of plant cellulose. Bacterial cellulose was obtained in the laboratory using a mixed community of microorganisms under static conditions on synthetic glucose media. Nitration of cellulose samples was carried out with a mixture of concentrated sulfuric and nitric acids; and the degree of substitution was calculated from the nitrogen content determined by the ferrosulfate method. The IR spectra of samples of the original cotton cellulose, as well as nitrates of bacterial and cotton cellulose, were recorded on a Vertex-70 infrared Fourier spectrometer in the range of wave numbers 4000...400 cm^{-1} . Cellulose acetylation was carried out in supercritical carbon dioxide by direct acetylation in an SFE-5000 supercritical fluid extraction system, Thar Process. The content of bound acetic acid in cellulose acetate was determined titrimetrically and then the degree of substitution was calculated. Fibers of plant cellulose and fibrils of bacterial cellulose were visualized by electron and atomic force microscopy. The yield of nitrate from pure cotton cellulose was 160 %, i.e., the degree of substitution was 2.20. Cellulose nitrate obtained from bacterial cellulose under similar conditions had a degree of substitution of 1.96. A new method of direct acetylation of lyophilically dried preparations of bacterial cellulose in supercritical carbon dioxide was proposed, which allows the process to be carried out without acid catalyst and at reduced consumption of acetylating agent. Acetylation of plant kraft cellulose showed a degree of substitution of 2.40, for bacterial cellulose – yield of diacetyl cellulose with the content of acetyl groups 50 %, this corresponds to the degree of substitution of 2.10. The obtaining of esters is due to both topochemical features of microfibrils and crystallinity of the material.

Keywords: cellulose fibers, cellulose acetate, cellulose nitrate, bacterial cellulose, plant cellulose, cellulose esters

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR within the scientific project No. 20-04-00457, with the use of the equipment of the Core Facility Center «Arktika» of the Northern (Arctic) Federal University, supercritical treatments were carried out with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSRU-2021-0009).

For citation: Vashukova K.S., Terentyev K.Y., Chukhchin D.G., Ivakhnov A.D., Poshina D.N. Effect of Topological Structure of Cellulose on the Processes of Acetylation and Nitration. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 176–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-176-189>

Введение

Клеточные стенки растений большей частью состоят из плотно уложенных микрофибрилл целлюлозы. Химические процессы лимитируются скоростью диффузии веществ к внутренним микрофибриллам и наличием пор в клеточной стенке. В бактериальной целлюлозе такое лимитирование исключено, т. к. микрофибриллы изначально имеют свободный доступ к жидкой фазе. В то же время перемещение химикатов внутрь самих микрофибрилл ограничено кристалличностью материала. Кристалличность бактериальной целлюлозы выше, чем целлюлозы растительного происхождения, у которой микрофибрилла через каждые 200 нм имеет аморфные участки [11]. Таким образом, предсказать интегральное воздействие этих факторов на процесс химической модификации целлюлозы затруднительно.

Результаты исследования свойств производных целлюлозы растительного и бактериального происхождения активно используют в производстве новых целлюлозных полуфабрикатов, препаратов и материалов. Растительное сырье является ключевым источником для изготовления целлюлозы и ее востребованных производных.

Для получения нитратов целлюлозы помимо традиционного хлопкового волокна предложено применять древесную целлюлозу, целлюлозу бамбука, отходы переработки сахарного тростника и других травянистых растений [21, 22, 25]. В качестве сырья для производства ацетатов целлюлозы могут выступать древесина [30], бамбук [15], отходы газетной бумаги [28] и использованных полотенец [39], сельскохозяйственные отходы от промышленной переработки биомассы пальм, орехов, хлопка, сахарного тростника и прочих тропических растений [10, 14, 19, 29].

Бактериальная целлюлоза наравне с растительной может быть применима для производства различных видов производных, включая эфиры [2, 17, 23, 26, 27, 35, 36, 38]. В литературе представлены экспериментальные данные по получению нитро- и ацетилпроизводных бактериальной целлюлозы, синтезированной в чистой культуре бактерий [16–18, 23, 33, 35, 38]. Развиваются исследовательские подходы, где сырьем для выделения бактериальной целлюлозы являются пищевые продукты, в т. ч. ферментированные микробными консорциумами [12, 20]. Гетерогенную и гомогенную этерификацию, например карбоксиметилирование, силилирование и ацетилирование, можно проводить на влажном или высушенном биополимере [16]. Чистую культуру клеток-продуцентов целлюлозы достаточно сложно поддерживать и предохранять от заражения посторонней микрофлорой, особенно при реализации нестерильных производств, поэтому перспективно использование для культивирования более стабильных смешанных симбиозов бактерий, синтезирующих целлюлозу, и дрожжей.

Достоинства целлюлозы как биоматериала – биосовместимость, низкая стоимость, химическая и физическая однородность [31]. Бактериальная целлюлоза отличается от растительной более высокой чистотой. Гидрогели на основе целлюлозы и ее производных (преимущественно карбоксиметилцеллюлозы и нитроцеллюлозы) и нановолокна из ацетатов целлюлозы пригодны для биомедицинских целей: тканевой инженерии, трехмерного культивирования клеток, доставки лекарственных препаратов в организм, заживления ран [13].

Особенностью биополимеров на основе целлюлозосодержащих материалов является лимитирование химических реакций, в т. ч. этерификации, топочимическими факторами: химический реагент долго диффундирует в глубь образца, и продукты взаимодействия медленно удаляются из зоны реакции. Исследования в области морфологии волокон, фибрилл бактериальной и растительной целлюлозы, физиологии растений и механизма порообразования определяют практическую возможность использования особенностей анатомических элементов сырья для изучения химических реакций и эффективного получения производных целлюлозы, в т. ч. таких как сложные эфиры.

Цель – оценка влияния топологической структуры целлюлозы растительного и бактериального происхождения на процессы ацетилирования и нитрования.

Объекты и методы исследования

Образцы и материалы. В качестве растительной целлюлозы использовали коммерческий препарат хлопковой целлюлозы с содержанием альфа-цел-

люлозы 96 % и полуфабрикат – высокооблагороженную сульфатную целлюлозу (содержание альфа-целлюлозы – 95 %, пентозанов – 6,1 %). Бактериальную целлюлозу получали в лаборатории кафедры биологии, экологии и биотехнологии Северного (Арктического) федерального университета. Образец представлял собой лиофильно высушенную пленку целлюлозы с остаточным содержанием общего азота 0,24–0,96 % и альфа-целлюлозы – 87 %. Материалы имели следующие показатели кристалличности: хлопок – 37,8 % [24], сульфатная целлюлоза – 47 % [32], бактериальная целлюлоза – 54,8 % [37]. Данные по кристалличности являются собственными данными.

Получение бактериальной целлюлозы. Бактериальную целлюлозу получали при культивировании микроорганизмов *Medusomyces gisevii*, смешанной культуры бактерий и дрожжей. Культивирование клеток проводили в термостате с функцией шейкера Environmental Shaker-Incubator ES-20 BioSan (Латвия) при 25 °С в течение 5...10 сут. в статических условиях на среде с рН 6,8 следующего состава: глюкоза – 20 г/л, гидрофосфат натрия – 2,7 г/л, пептон – 1 г/л и дрожжевой экстракт – 1 г/л. Стерильность микробиологических анализов и пересевы культуры обеспечивали использованием ламинарного шкафа с УФ-системой Lamsystems (Россия). Бактериальную целлюлозу отделяли от культуральной среды и промывали дистиллированной водой. Целлюлозу очищали от примесей по схеме, описанной в работе [23], с модификациями. Для этого измельченный материал кипятили в 0,1 н. NaOH в течение 1 ч, промывали дистиллированной водой до рН 7, обезвоживали центрифугированием при 4200 об./мин. Затем повторяли процедуру кипячения, отмывки и обезвоживания, после чего бактериальную целлюлозу замораживали и лиофильно высушивали с использованием оборудования Labconco (FreeZone 2.5 L).

Нитрование целлюлозы. Образцы обрабатывали смесью концентрированных H_2SO_4 и HNO_3 [35]. Условия нитрования: H_2SO_4 и HNO_3 в массовом соотношении 3:1, содержание воды в нитрующей смеси – 18 %, температура – 20 °С, продолжительность нитрования – 60 мин, модуль нитрования – 100. После нитрования нитроцеллюлозу отделяли от нитрующей смеси, отмывали дистиллированной водой, стабилизировали 1%-м раствором $NaHCO_3$ и промывали горячей водой. Нитраты целлюлозы высушивали до постоянной массы, определяли выход и рассчитывали степень замещения. Данные о содержании азота в образцах получали при помощи ферросульфатного метода, а затем рассчитывали степень замещения [6]. Выход нитратов целлюлозы устанавливали гравиметрически.

ИК-спектры образцов исходной бактериальной целлюлозы, а также нитратов бактериальной и хлопковой целлюлозы регистрировали на инфракрасном фурье-спектрометре Vertex-70 (Bruker, Германия) в диапазоне волновых чисел 4000...400 cm^{-1} .

Ацетилирование целлюлозы в среде сверхкритического диоксида углерода. Проводили прямое ацетилирование в системе сверхкритической флюидной экстракции SFE-5000 (Thar Process, США) по методике, описанной в работе [7], при следующих условиях: давление – 200 атм, температура – 80 °С, продолжительность – 1 ч, расход углекислого ангидрида – 300 % от массы абсо-

лютно сухой целлюлозы. В ацетате целлюлозы титриметрически определяли содержание связанной уксусной кислоты и рассчитывали степень замещения. Выход ацетатов целлюлозы устанавливали гравиметрически.

Исследование морфологии образцов целлюлозы. Анализ выполняли методом электронной микроскопии на сканирующем микроскопе высокого разрешения Sigma VP Zeiss, Германия (ускоряющее напряжение – 10 кВ, детектор – InLens). Для определения рельефа поверхности использовали атомно-силовой микроскоп MultiMod 8 Bruker (Германия).

Результаты исследования и их обсуждение

Основным источником целлюлозы для получения ее сложных эфиров является растительное сырье. За период многолетних исследований проанализировано получение производных целлюлозы на основе растительного сырья различного происхождения: хлопковой, древесной сульфитной и сульфатной, микрокристаллической и других типов целлюлозы. Результаты изучения структуры исходного целлюлозосодержащего сырья методом рентгенодифрактометрии и ИК-спектроскопии показывают, что оно определяет особенности надмолекулярной структуры целлюлозы, а следовательно, влияет на ее свойства, реакционную способность и качество продуктов модификации [9].

Образование целлюлозы в растительных и бактериальных клетках идет на поверхности мембраны клетки при участии терминального ферментного комплекса. Образующиеся макромолекулы целлюлозы вследствие высокой удельной поверхности агрегируют с формированием микрофибрилл, которые укрупняются и укладываются в фибриллярную структуру [34].

Исследование морфологии волокон и микрофибрилл растительной и бактериальной целлюлозы. Примером чистой природной целлюлозы является хлопковое волокно. Оно представляет собой растительную вытянутую клетку, которая в процессе развития растения наращивает клеточную оболочку и формирует волокно (рис. 1, а). Длина волокна может достигать нескольких сантиметров, а диаметр варьирует от 2 до 60 мкм. Хлопковая целлюлоза имеет очень плотную кристаллическую укладку, стабилизированную межмолекулярными водородными связями. Поверхность волокна однородна (рис. 1, б) и почти полностью сформирована из целлюлозы с незначительными включениями липидов, экстрактивных, пектиновых и минеральных веществ.

Структурные отличия хлопковой и древесной целлюлозы заключаются в упаковке элементарных фибрилл внутри микрофибриллы. В древесных растениях фибриллы целлюлозы «вплетены» в аморфный матрикс, состоящий из гемицеллюлоз и лигнина; образуется сложная лигноуглеводная матрица, которая обеспечивает последовательную укладку целлюлозных молекул в слоях клеточной стенки. Такая структура клеточной стенки обуславливает высокую механическую прочность древесных волокон. Сообщение между клетками растения при формировании клеточной стенки обеспечивается порами разных типов (рис. 1, в, г).

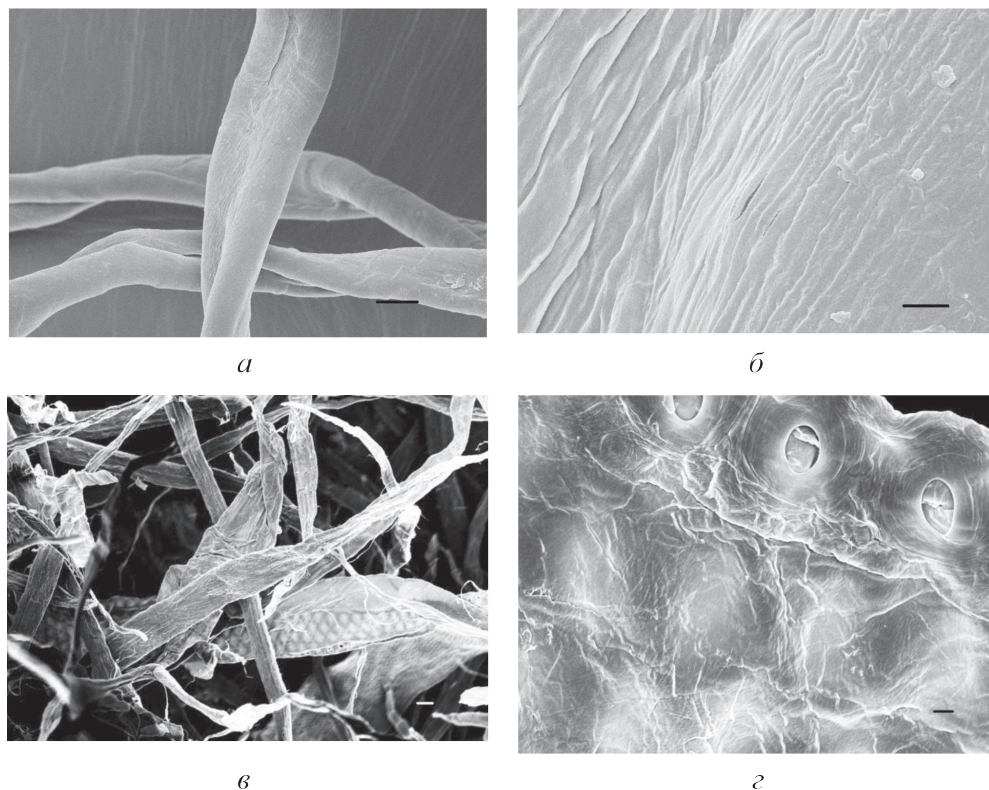


Рис. 1. Волокна хлопковой целлюлозы (*а*) и их поверхность (*б*), волокна сульфатной лиственной целлюлозы (*в*) и поры в структуре волокна сульфатной лиственной целлюлозы (*г*). Изображения получены при помощи сканирующего электронного микроскопа. Масштабная линейка, мкм: *а* – 10; *б* – 1; *в* – 10; *г* – 1

Fig. 1. SEM-images of cotton cellulose fibers (*a*) and their surface (*b*), kraft pulp fibers (*в*) and pores in the fiber structure of kraft pulp (*г*) Scale bar, μm : *a* – 10; *b* – 1; *в* – 10; *г* – 1

Современные исследования производных целлюлозы связаны с поиском новых источников целлюлозосодержащего сырья. Например, бактериальная целлюлоза применяется в ряде производств, включая биофармацевтику.

Микроскопирование целлюлозных биопленок, синтезированных сообществом бактерий, показало присутствие микрофибрилл целлюлозы с разной толщиной и клеток микроорганизмов в целлюлозной матрице (рис. 2, *а*, *в*). Проведенное ранее исследование установило среднюю ширину микрофибрилл целлюлозы – $34 \pm 0,8$ нм [3]. Визуализирована поверхность целлюлозной матрицы с бактериальными клетками (рис. 2, *а*). При высушивании на воздухе возникающие силы поверхностного натяжения стягивают микрофибриллы и бактерии в плотную массу, чего не происходит при лиофильном высушивании. На рис 2, *а* видны вытянутые (палочковидные) бактериальные клетки продуцентов целлюлозы. Биосинтез микрофибрилл бактериальной целлюлозы, как и у растений, происходит при участии мембранного фермента. Микрофибриллы целлюлозы образуются на поверхности клетки бактерии и, не имея пространственных ограничений, случайно формируют рыхлую целлюлозную матрицу, удерживающую бактериальную массу в виде слоистой биопленки.

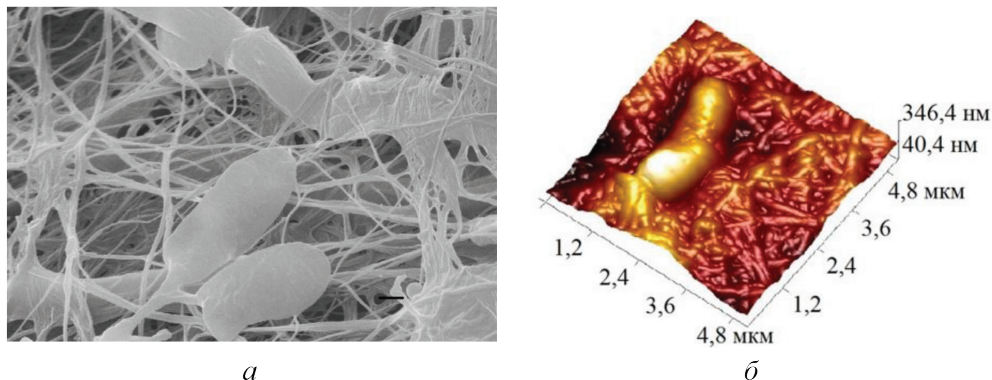


Рис. 2. Снимки микрофибрилл бактериальной целлюлозы, визуализированных на электронном (а) и атомно-силовом (б) микроскопах [4]. Масштабная линейка: а – 200 нм
 Fig. 2. Bacterial cellulose microfibrils images obtained with electron (a) and atomic force (б) microscopes [4]. Scale bar: a – 200 nm

Происхождение и структура исходного целлюлозного материала влияют на качество получаемых производных. В частности, методом рентгенофазового анализа показано [8], что при нитровании хлопковой и древесной целлюлозы в одной и той же нитрующей смеси наиболее однородные нитраты целлюлозы дает использование хлопковой целлюлозы. Происхождение целлюлозы может влиять на процессы деструкции, полноту химических реакций, скорость и глубину гидролиза и этерификации. Образование эфиров целлюлозы обеспечивается доступностью гидроксильных групп для этерифицирующего агента, которую характеризуют понятием реакционной способности. Это интегральный показатель, зависящий от многих факторов, в т. ч. от наличия нецеллюлозных примесей и от удельной поверхности волокон целлюлозы [4, 5].

Для оценки реакционной способности растительной и бактериальной целлюлозы проводили нитрование и ацетилирование. Бактериальную целлюлозу предварительно лиофильно высушивали. Лиофильное высушивание предотвращает эффекты ороговения целлюлозного материала, возникающие при высушивании на воздухе, при этом в большей степени сохраняется реакционная способность целлюлозы.

Получение и анализ нитратов целлюлозы. Выход нитратов из хлопковой целлюлозы – 160 %, т. е. степень замещения – 2,20 (массовая доля азота – 11,80 %). При нитровании бактериальной целлюлозы массовая доля азота в продукте составила в среднем 10,96 %, что соответствует степени замещения 1,96. Выход нитратов целлюлозы при этом – 155 %. Подбор оптимальных условий нитрования бактериальной целлюлозы, полученной в чистой культуре продуцента, таких как температура, модуль нитрования, соотношение серной и азотной кислот, продолжительность этерификации, позволяет достичь более высокой степени замещения (до 2,85 [35]).

Подобранные нами условия нитрования: соотношение кислот, модуль нитрования, температура и продолжительность процесса – позволяют получать продукт со степенью замещения не менее 2,50. На снижение степени замещения оказала влияние высокая кристалличность по сравнению с рас-

тительной целлюлозой. В производственных условиях неизбежно возникнет необходимость установить баланс между затратами на обезвоживание и остаточной влажностью материала, обеспечивающей сохранение хорошей реакционной способности. Полное термическое высушивание целлюлозы приводит к уменьшению реакционной способности ее гидроксильных групп в условиях гетерогенного процесса из-за образования большого количества водородных связей между молекулами и сокращению межфибрилярного пространства, определяющего топохимическое лимитирование процесса. С учетом этого обстоятельства, было выбрано среднее содержание воды в нитрующей смеси – 18 %. При этом содержании воды степень замещения находится на уровне примерно 2,20, что соответствует значению, полученному нами для хлопковой целлюлозы, которую использовали в качестве эталонного образца, практически полностью лишенного примесей.

В ИК-спектрах (рис. 3) нитратов целлюлозы растительного и бактериального происхождения при нитровании снижается интенсивность широкой полосы сложного контура валентных колебаний ОН-групп около 3300 см^{-1} ; увеличивается интенсивность полос 1660 см^{-1} и 1280 см^{-1} , что соответствует валентным асимметричным и валентным симметричным колебаниям NO_2 -группы [1].

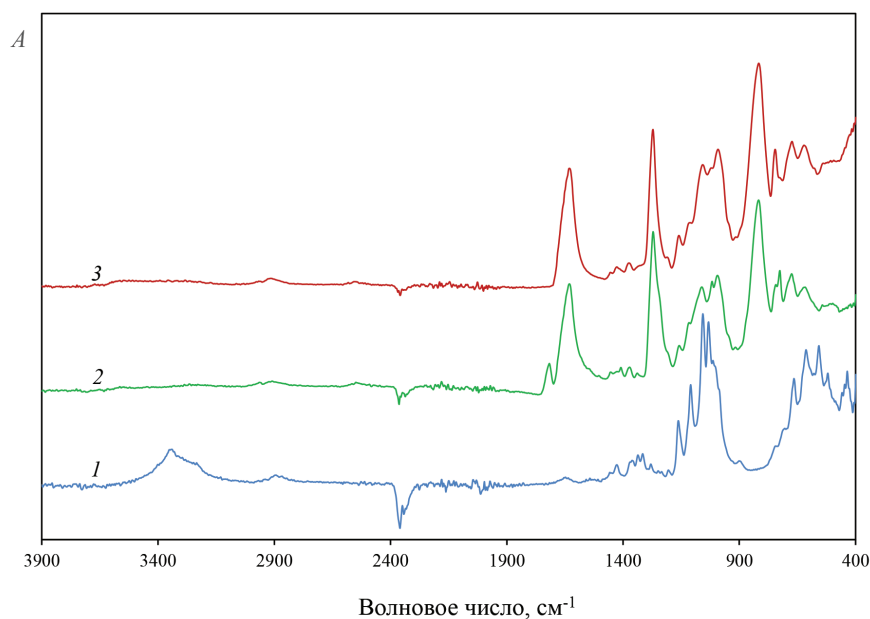


Рис. 3. ИК-спектры исходной бактериальной (1), нитрованной хлопковой (2) и нитрованной бактериальной (3) целлюлозы (A – оптическая плотность)

Fig. 3. IR spectra of initial bacterial cellulose (1), nitrated cotton (2) and nitrated bacterial (3) cellulose (A – optical density)

Аморфные участки микрофибрилл бактериальной целлюлозы расположены преимущественно на поверхности [2], тогда как для растительной целлюлозы характерна аморфно-кристаллическая структура. Высокая кристалличность исходной бактериальной целлюлозы (54,8 %) по сравнению с растительной (сульфатная целлюлоза – 47,0 %; хлопковая – 37,8 %) может проявляться как

фактор, лимитирующий перемещение химикатов внутрь микрофибрилл, и приводит к пониженной степени замещения.

Получение и анализ ацетатов целлюлозы. Другими производными целлюлозы, имеющими широкий спектр применения, являются ацетаты. Для ацетилирования применяют очищенную хлопковую и высокооблагороженную сульфатную целлюлозу. Кроме высокой химической чистоты, она должна обладать большой и равномерной реакционной способностью. Ранее была показана возможность синтеза ацетатов из бактериальной целлюлозы, полученной в чистой культуре продуцента, путем гетерогенного [16] и гомогенного [33] ацетилирования. В работе [7] предложен новый метод прямого ацетилирования целлюлозы в среде сверхкритического диоксида углерода, что позволяет осуществлять процесс без кислотного катализатора и при пониженном расходе ацетилирующего агента.

Преимуществом использованного нами метода ацетилирования является уменьшенный расход уксусного ангидрида, а также возможность получения диацетата, минуя этапы получения триацетата целлюлозы и его частичного гидролиза. Поскольку ацетилирование реализуется без предварительного растворения образца, это повышает требования к его реакционной способности в рамках гетерогенного процесса. В нашей работе ацетилирование бактериальной целлюлозы обеспечило получение полностью растворимого в ацетоне ацетата с содержанием ацетильных групп 50 %, что соответствует степени замещения 2,10. Для сравнения в аналогичных условиях из высокооблагороженной сульфатной целлюлозы был получен продукт ацетилирования со степенью замещения 2,40, выходом – 225 % с содержанием ацетильных групп 54,4 %.

Таким образом, при ацетилировании растительной и бактериальной целлюлозы наблюдаются различия. Микрофибриллы бактериальной целлюлозы более доступны для диффузии этерифицирующих реагентов. Исходный образец бактериальной целлюлозы представляет собой неупорядоченные и пространственно разделенные микрофибриллы (при лиофильном высушивании) в отличие от растительных образцов, микрофибриллы которых структурированно уложены в клеточной стенке. Исследование показало, что лимитирующим фактором этерификации является кристалличность целлюлозы. Это подтверждается ранее полученными результатами по размерам и форме кристаллитов микрофибрилл растительной и бактериальной целлюлоз: для растительной целлюлозы размеры примерно $21,2 \times 200 \dots 300$ нм, для бактериальной – 16,6 нм в ширину при длине, соответствующей длине микрофибриллы [2].

Заключение

В работе представлены результаты получения нитратов и ацетатов из растительной и бактериальной целлюлозы. Степень замещения нитратов хлопковой целлюлозы – 2,20, тогда как для бактериальной целлюлозы – в среднем 1,96. Выход нитратов хлопковой целлюлозы при этом – 160 %, бактериальной – 155 %. Степень замещения растительной сульфатной целлюлозы при ацетилировании предложенным методом – 2,40 (с содержанием ацетатов 54 %). При ацетилировании бактериальной целлюлозы в аналогичных условиях получен

высокий выход диацетилцеллюлозы с содержанием ацетатов 50 %, что соответствует степени замещения 2,10.

Процесс этерификации обусловлен как топологическими особенностями пространственного расположения микрофибрилл в материале, так и кристалличностью образцов целлюлозы. Если микрофибриллы целлюлозы плотно упакованы в клеточной стенке, что характерно для растительных целлюлоз, то топологические особенности затрудняют доступ химических агентов к микрофибриллам и влияют на степень замещения при этерификации. В случае лиофильно высушенной бактериальной целлюлозы топологические особенности воздействуют несущественно и больший вклад вносит кристалличность целлюлозы.

Высокая кристалличность исходной бактериальной целлюлозы по сравнению с растительной, наряду с различиями в размерах кристаллитов, является фактором, обуславливающим пониженную степень замещения в продуктах этерификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / пер. с англ. В.М. Акимова и др.; под ред. и с предисл. Ю.А. Пентина. М.: Иностран. лит., 1963. 590 с.
Bellami L. *Infrared Spectra of Complex Molecules*. Moscow, Foreign literature Publ., 1963. 590 p. (In Russ.).
2. Болотова К.С., Буюклинская О.В., Чистякова А.С., Травина О.В., Чухчин Д.Г. Получение и оценка токсичности *in vivo* микрокристаллической целлюлозы бактериального происхождения // Экология человека. 2018. № 2. С. 21–25.
Bolotova K.S., Buyuklinskaya O.V., Chistyakova A.S., Travina O.V., Chukhchin D.G. Production and *in vivo* Toxicity Testing of Microcrystalline Cellulose Derived from Bacterial Cellulose. *Ekologiya cheloveka* = Human ecology, 2018, no. 2, pp. 21–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-2-21-25>
3. Болотова К.С., Чухчин Д.Г., Майер Л.В., Гурьянова А.А. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 6. С. 153–165.
Bolotova K.S., Chukhchin D.G., Majer L.V., Guryanova A.A. Morphological Features of the Fibrillar Structure of Plant and Bacterial Cellulose. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2016, no. 6, pp. 153–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.6.153>
4. Болотова К.С., Выдрина И.В., Чухчин Д.Г., Новожилов Е.В., Синельников И.Г., Рудакова В.А., Терентьев К.Ю., Канарский А.В. Состав сообщества *Medusomyces gisevii* и свойства синтезируемой им бактериальной целлюлозы // Вестн. техн. ун-та. 2019. Т. 22, № 10. С. 39–43.
Bolotova K.S., Vydrina I.V., Chukhchin D.G., Novozhilov E.V., Sinelnikov I.G., Rudakova V.A., Terentyev K.Y., Kanarskiy A.V. Composition of the *Medusomyces gisevii* Community and the Properties of Bacterial Cellulose Synthesized by Them. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Bulletin of the Technological University, 2019, vol. 22, no. 10, pp. 39–43. (In Russ.).
5. Виноградова В.Р., Болотова К.С. Влияние химической и ферментативной обработки на компонентный состав и структуру материала на основе бактериальной целлюлозы // Биотехнологии в химико-лесном комплексе: материалы Междунар. науч. конф., Архангельск, 11–12 сент. 2014 г. Архангельск: САФУ, 2014. С. 118–122.

Vinogradova V.R., Bolotova K.S. Influence of Chemical and Enzymatic Treatment on the Component Composition and Structure of Material Based on Bacterial Cellulose. *Biotechnologies in the Chemical-Forestry Complex: Proceedings of the Scientific Conf.* Arkhangelsk, 2014, pp. 118–122. (In Russ.).

6. Генши К.В., Колосов П.В., Базарнова Н.Г. Количественный анализ нитратов целлюлозы методом ИК-Фурье-спектроскопии // Химия раст. сырья. 2010. № 1. С. 63–66.

Gensh K.V., Kolosov P.V., Bazarnova N.G. Quantitative Analysis of Cellulose Nitrates by FT-IR Spectroscopy. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2010, no. 1, pp. 63–66. (In Russ.).

7. Ивахнов А.Д., Боголицын К.Г., Скребец Т.Э. Получение вторичного ацетата целлюлозы прямым ацетилированием в среде сверхкритического диоксида углерода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 3. С. 114–119.

Ivahnov A.D., Bogolicyn K.G., Skrebets T.E. Preparation of Secondary Cellulose Acetate by Direct Acetylation in Supercritical Carbon Dioxide. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2010, no. 3, pp. 114–119. (In Russ.).

8. Коваленко В.И. Молекулярно-структурная неоднородность нитратов целлюлозы // Успехи химии. 1995. Т. 64, № 8. С. 803–817.

Kovalenko V.I. Molecular Structural Heterogeneity of Cellulose Nitrates. *Uspekhi himii* = Russian Chemical Reviews, 1995, vol. 64, no. 8, pp. 803–817. (In Russ.).

9. Панченко О.А., Титова О.И. Проблемы и достижения при получении нитратов целлюлозы // Химия раст. сырья. 2005. № 3. С. 85–88.

Panchenko O.A., Titova O.I. Problems and Achievements in the Production of Cellulose Nitrates. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2005, no. 3, pp. 85–88. (In Russ.).

10. Bahmid N.A., Syamsu K., Maddu A. Production of Cellulose Acetate from Oil Palm Empty Fruit Bunches Cellulose. *Chemical and Process Engineering Research*, 2013, vol. 17, iss. 21, pp. 12–20.

11. Bolotova K., Travina O., Chukhchin D., Novozhilov E. The Morphological Structure of Microcrystallites Derived from Plant and Bacterial Cellulose. *Nano, Bio and Green-Technologies for a Sustainable Future: 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017*. Sofia, STEF92 Technology Ltd., 2017, vol. 17, pp. 407–412. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/61/S24.053>

12. Budaeva V.V., Gismatulina Y.A., Mironova G.F., Skiba E.A., Gladysheva E.K., Kashcheyeva E.I., Baibakova O.V., Korchagina A.A., Shavyrkin N.A., Golubev D.S., Bychin N.V., Pavlov I.N., Sakovich G.V. Bacterial Nanocellulose Nitrates. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, iss. 12, art. 1694. <https://doi.org/10.3390/nano9121694>

13. Chang C., Zhang L. Cellulose-based Hydrogels: Present Status and Application Prospects. *Carbohydrate Polymers*, 2011, vol. 84, iss. 1, pp. 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.023>

14. Cheng H.N., Dowd M.K., Selling G.W., Biswas A. Synthesis of Cellulose Acetate from Cotton Byproducts. *Carbohydrate polymers*, 2010, vol. 80, iss. 2, pp. 449–452. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.11.048>

15. Feng T., Deng C., Xue Q., Wang Y., Huang J., Xiang Q. *Bamboo Pulp Fiber Suitable for Nitrocellulose, Cellulose Acetate and Cellulose Fiber and its Production Method*. Patent China, no. CN1995495B, 2006.

16. Geyer U., Heinze T., Stein A., Klemm D., Marsch S., Schumann D., Schmauder H.P. Formation, Derivatization and Applications of Bacterial Cellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, 1994, vol. 16, iss. 6, pp. 343–347. [https://doi.org/10.1016/0141-8130\(94\)90067-1](https://doi.org/10.1016/0141-8130(94)90067-1)

17. Huang Y., Zhu C., Yang J., Nie Y., Chen C., Sun D. Recent Advances in Bacterial Cellulose. *Cellulose*, 2014, vol. 21, iss. 1, pp. 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0088-z>

18. Ifuku S., Nogi M., Abe K., Handa K., Nakatsubo F., Yano H. Surface Modification of Bacterial Cellulose Nanofibers for Property Enhancement of Optically Transparent Composites: Dependence on Acetyl-Group DS. *Biomacromolecules*, 2007, vol. 8, iss. 6, pp. 1973–1978. <https://doi.org/10.1021/bm070113b>
19. Israel A.U., Obot I.B., Umoren S.A., Mkpennie V., Asuquo J.E. Production of Cellulosic Polymers from Agricultural Wastes. *E-Journal of Chemistry*, 2008, vol. 5, iss. 1, pp. 81–85. <https://doi.org/10.1155/2008/436356>
20. Jamal S.H., Roslan N.J., Shah N.A.A., Noor S.A.M., Ong K.K., Yunus W.M.Z.W. Preparation and Characterization of Nitrocellulose from Bacterial Cellulose for Propellant Uses. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 29, pp. 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.540>
21. Liu J. *Nitrate Esters Chemistry and Technology*. Singapore, Springer, 2019. 684 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6647-5>
22. Liu J.P. *Method of Making Nitrocellulose from Eulaliopsis Binata as Raw Material*. Patent China, no. CN1011970, 1991.
23. Luo Q., Zhu J., Li Z., Duan X., Pei C., Mao C. The Solution Characteristics of Nitrated Bacterial Cellulose in Acetone. *New Journal of Chemistry*, 2018, vol. 42, iss. 22, pp. 18252–18258. <https://doi.org/10.1039/C8NJ02018C>
24. Malkov A., Tyshkunova I., Vidrina I., Novozhilov E. Diffractometric Method for Determining the Crystallinity Degree of Cellulose. *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2018*. Vienna, Austria, 2018, vol. 18, iss. 6.4, pp. 119–126. <https://doi.org/10.5593/sgem2018V/6.4/S08.016>
25. Mattar H., Baz Z., Saleh A., Shalaby A.S., Azzazy A.E., Salah H., Ismail I. Nitrocellulose: Structure, Synthesis, Characterization, and Applications. *Water, Energy, Food and Environment Journal*, 2020, no. 3, pp. 1–15.
26. Qiu K., Netravali A.N. A Review of Fabrication and Applications of Bacterial Cellulose Based Nanocomposites. *Polymer Reviews*, 2014, vol. 54, iss. 4, pp. 598–626. <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.896018>
27. Reiniati I., Hrymak A.N., Margaritis A. Recent Developments in the Production and Applications of Bacterial Cellulose Fibers and Nanocrystals. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, vol. 37, iss. 4, pp. 510–524. <https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1189871>
28. Rodrigues Filho G., Monteiro D.S., da Silva Meireles C., de Assunção R.M.N., Cerqueira D.A., Barud H.S., Ribeiro S.J.L., Messadeq Y. Synthesis and Characterization of Cellulose Acetate Produced from Recycled Newspaper. *Carbohydrate Polymers*, 2008, vol. 73, iss. 1, pp. 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.11.010>
29. Rodrigues Filho G., da Cruz S.F., Pasquini D., Cerqueira D.A., de Souza Prado V., de Assunção R.M.N. Water Flux Through Cellulose Triacetate Films Produced from Heterogeneous Acetylation of Sugar Cane Bagasse. *Journal of Membrane Science*, 2000, vol. 177, iss. 1–2, pp. 225–231. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)00469-5](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)00469-5)
30. Sato H., Uraki Y., Kishimoto T., Sano Y. New Process for Producing Cellulose Acetate from Wood in Concentrated Acetic Acid. *Cellulose*, 2003, vol. 10, pp. 397–404. <https://doi.org/10.1023/A:1027359708581>
31. Samadian H., Maleki H., Allahyari Z., Jaymand M. Natural Polymers-based Light-Induced Hydrogels: Promising Biomaterials for Biomedical Applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 2020, vol. 420, art. 213432. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213432>
32. Shevchenko A.R., Tyshkunova I.V., Chukhchin D.G., Malkov A.V., Toptunov E.A., Telitsin V.D., Rozhkova A.M., Sinitsyna O.A., Gofman I.V., Aksenov A.S. Production of Biomodified Bleached Kraft Pulp by Catalytic Conversion Using *Penicillium verruculosum* Enzymes: Composition, Properties, Structure and Application. *Catalysts*, 2023, vol. 13, iss. 1, art. 103. <https://doi.org/10.3390/catal13010103>

33. Schluffer K., Schmauder H.P., Dorn S., Heinze T. Efficient Homogeneous Chemical Modification of Bacterial Cellulose in the Ionic Liquid 1-N-butyl-3-Methylimidazolium Chloride. *Macromolecular Rapid Communications*, 2006, vol. 27, iss. 19, pp. 1670–1676. <https://doi.org/10.1002/marc.200600463>
34. Speicher N.L., Li P.Z., Wallace I.S. Phosphoregulation of the Plant Cellulose Synthase Complex and Cellulose Synthase-Like Proteins. *Plants*, 2018, vol. 7, iss. 3. 52 p. <https://doi.org/10.3390/plants7030052>
35. Sun D.P., Ma B., Zhu C.L., Liu C.S., Yang J.Z. Novel Nitrocellulose Made from Bacterial Cellulose. *Journal of Energetic Materials*, 2010, vol. 28, iss. 2, pp. 85–97. <https://doi.org/10.1080/07370650903222551>
36. Sunasee R., Hemraz U.D., Ckless K. Cellulose Nanocrystals: a Versatile Nanoplatfom for Emerging Biomedical Applications. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 2016, vol. 13, iss. 9, pp. 1243–1256. <https://doi.org/10.1080/17425247.2016.1182491>
37. Vydrina I., Malkov A., Vashukova K., Tyshkunova I., Mayer L., Faleva A., Shestakov S., Novozhilov E., Chukhchin D. A New Method for Determination of Lignocellulose Crystallinity from XRD Data using NMR Calibration. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2023, vol. 5, art. 100305. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100305>
38. Yamamoto H., Horii F., Hirai A. Structural Studies of Bacterial Cellulose through the Solid-Phase Nitration and Acetylation by CP/MAS 13 C NMR Spectroscopy. *Cellulose*, 2006, vol. 13, pp. 327–342. <https://doi.org/10.1007/s10570-005-9034-z>
39. Yıldız Ş., Morcali M.H., Ziba C.A., Copcu B., Dolaz M. Synthesis and Characterization of Cellulose Derivatives from Industrial Towel Waste. *ChemistrySelect*, 2019, vol. 4, iss. 28, pp. 8358–8364. <https://doi.org/10.1002/slct.201900398>

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

Научная статья

УДК 661.183.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-190-203

Сорбционно-структурные свойства аэрогельных материалов на основе биополимеров

О.С. Бровко[✉], канд. хим. наук, вед. науч. сотр., доц.;

ResearcherID: [AAF-5387-2019](https://orcid.org/0000-0002-1961-7831), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-7831>

И.А. Паламарчук¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [AAF-5454-2019](https://orcid.org/0000-0002-2947-1370), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2947-1370>

Н.А. Горшкова¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [AAF-5411-2019](https://orcid.org/0000-0002-2036-2418), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2036-2418>

Н.И. Богданович², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

А.Д. Ивахнов^{1,2}, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; brovko-olga@rambler.ru[✉], irpalamarchuk@mail.ru, nat.gorshkova@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.bogdanovich@narfu.ru, ivahnov-tema@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.23 / Одобрена после рецензирования 20.06.23 / Принята к печати 27.06.23

Аннотация. В настоящее время для выведения избыточного количества тяжелых металлов и токсинов из живых организмов успешно применяются аэрогельные материалы в качестве энтеро- и аппликационных сорбентов. Неисчерпаемой сырьевой базой для создания аэрогельных материалов являются природные биополимеры альгинат и хитозан, а также различные производные лигнина. На их основе разработано значительное количество сорбционных материалов и раневых покрытий различных типов, что связано не только с широким спектром физико-химических свойств названных полимеров и их уже доказанной медико-биологической активностью, но и с распространенностью и возобновляемостью сырьевых источников для производства данных полимеров, простотой извлечения, возможностью достижения высокой степени очистки и сравнительно невысокой ценой. Ключевой стадией синтеза аэрогельных материалов является формирование прочного гидрогеля – каркаса. Один из технологических приемов – получение интерполиэлектrolитного армирующего гидрогеля. В работе предложены 2 упаковочные модели формирования структуры интерполиэлектrolитных комплексов на основе пар биополимеров: «альгинат натрия – хитозан» и «лигносульфонат натрия – хитозан». Первая модель – блочная, при которой структура формируется за счет ионных связей между карбоксильными группами альгината натрия и аминогруппами хитозана, а также кооперативной системы водородных связей и дисперсионных взаимодействий. Вторая модель – агрегационно-трубчатая, структура которой образуется посредством ионных связей между сульфогруппами (в составе палочкообразных надмолекулярных структур лигносульфоната натрия) и аминогруппами хитозана, а также водородных

связей и дисперсионных взаимодействий. При высушивании интерполиэлектrolитных комплексов в сверхкритических условиях формируются прочные фазовые контакты, при этом изменения в структуре геля становятся необратимыми. В результате получены гидрофобные микро- и мезопористые 2-компонентные аэрогелевые материалы, различающиеся внутренней структурой. Аэрогелевые материалы, структура которых образована по 1-й из названных моделей, характеризуются фибриллярной структурой, а по 2-й – структурными элементами сферической формы. Полученные аэрогелевые материалы обладают высокой сорбционной активностью по отношению к воде и широкому кругу тяжелых металлов и низкомолекулярных токсинов. Цель работы – исследование структурно-сорбционных свойств аэрогелевых материалов, основа которых – биополимеры различной структурной организации. Значительное увеличение сорбционной активности аэрогелевых материалов «альгинат натрия – хитозан» в сравнении с «лигносульфонат натрия – хитозан» связано, по-видимому, с их различной надмолекулярной структурой. Действует совокупность механизмов сорбции: намокание, всасывание, диффузия, осмотические явления и химическое взаимодействие, обусловленное высокопористой структурой аэрогелевых материалов и наличием сорбционно-активных центров.

Ключевые слова: биополимеры, лигносульфонат натрия, альгинат натрия, хитозан, аэрогелевые материалы, металлы, краситель, сорбция

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФ № 23-23-10021.

Для цитирования: Бровко О.С., Паламарчук И.А., Горшкова Н.А., Богданович Н.И., Ивахнов А.Д. Сорбционно-структурные свойства аэрогелевых материалов на основе биополимеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 190–203. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-190-203>

Original article

Sorption and Structural Properties of Aerogel Materials Based on Biopolymers

Olga S. Brovko¹✉, Candidate of Chemistry, Leading Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAF-5387-2019](https://orcid.org/0000-0002-1961-7831), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-7831>

Irina A. Palamarchuk¹, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAF-5454-2019](https://orcid.org/0000-0002-2947-1370), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2947-1370>

Natalia A. Gorshkova¹, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAF-5411-2019](https://orcid.org/0000-0002-2036-2418), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2036-2418>

Nikolay I. Bogdanovich², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

Artem D. Ivakhnov^{1,2}, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Nikolsky, 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; brovko-olga@rambler.ru✉, irpalamarchuk@mail.ru, nat.gorshkova@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.bogdanovich@narfu.ru, ivahnov-tema@yandex.ru

Received on May 24, 2023 / Approved after reviewing on June 20, 2023 / Accepted on June 27, 2023

Abstract. Nowadays aerogel materials (AM) are successfully used as entero- and applicative sorbents to eliminate excessive amounts of heavy metals and toxins from living organisms. Natural biopolymers alginate and chitosan, as well as various lignin derivatives are an inexhaustible raw material base for the creation of AM. A significant number of sorption materials and wound coatings of various types have been developed on their basis, which is associated not only with a wide range of physicochemical properties of these polymers and their already proven biomedical activity, but also with the prevalence and renewability of raw material sources for the production of these polymers, ease of extraction, the possibility of achieving a high degree of purification and relatively low price. The key stage in the AM synthesis is the formation of a strong hydrogel which is the AM framework. One of the technological methods is to obtain interpolyelectrolyte solid hydrogel. The paper proposes two different packaging models for the formation of the structure of interpolyelectrolyte complexes (IPEC) based on biopolymers pairs: sodium alginate (ALNa)–chitosan (CT) and sodium lignosulfonate (LSNa)–CT. The first model is a block model, in which the structure is formed due to ionic bonds between the carboxyl groups of ALNa and amino groups of CT, as well as a cooperative system of hydrogen bonds and dispersion interactions. The second model is an aggregation-tubular model, the structure of which is formed through ionic bonds between sulfogroups (within the rod-shaped supramolecular structures of LSNa) and amino groups of CT, as well as hydrogen bonds and dispersion interactions. Upon the process of IPEC drying under supercritical (SC-) conditions, strong phase contacts are formed, and the changes in the gel structure become irreversible. As a result, hydrophobic micro- and mesoporous two-component AMs differing in internal structure were obtained. AM ALNa–CT are characterized by fibrillar structure, and LSNa–CT – by structural elements of spherical shape. The obtained AM ALNa–CT and LSNa–CT have high sorption activity towards water and a wide range of heavy metals and low molecular weight toxins. The purpose of the work is to study the structural and sorption properties of AM based on biopolymers of various structural organization. A significant increase in the sorption activity of AM ALNa–CT in comparison with LSNa–CT is apparently due to their different supramolecular structure. There is a combination of several sorption mechanisms such as wetting, absorption, diffusion, osmotic phenomena and chemical interaction due to the highly porous structure of AM and the presence of sorption-active centers.

Keywords: biopolymers, lignosulfonate, alginate, chitosan, aerogel materials, metals, dyes, sorption

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 23-23-10021.

For citation: Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Gorshkova N.A., Bogdanovich N.I., Ivakhnov A.D. Sorption and Structural Properties of Aerogel Materials Based on Biopolymers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 190–203. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-190-203>

Введение

Создание новых сорбционных аэрогельных материалов (AM) является актуальной областью науки, технологии и медицины. Аэрогели представляют собой класс высокопористых материалов 3-мерной разветвленной структуры с низкой плотностью и способностью сорбировать большое количество органических жидкостей, минеральных и токсичных веществ, в десятки и сотни раз превышающих собственную массу материала [14, 24]. Роль сорбционных мате-

риалов в медицине значительна. Благодаря высокоразвитой пористой структуре АМ эффективно используются для детоксикации живых организмов и при гемо-, энтеро- и аппликационной сорбции. В качестве неисчерпаемой сырьевой базы для создания АМ выступают природные биополимеры альгинат, хитозан, а также различные производные лигнина, в частности сульфированные лигнины – лигносульфонаты. Выбор перечисленных биополимеров обусловлен тем, что они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к сорбентам для очистки воды, энтеросорбентам: отсутствие токсичных компонентов в материале, хорошие сорбционные свойства, высокая скорость поглощения, невысокая стоимость и доступность сырья.

Лигнины относятся к числу важнейших компонентов растительной ткани, их полимерная структура (сверхразветвленная, звездообразная, линейная) зависит от многих факторов. Мономерным звеном лигнина принято считать фенилпропановую единицу. Технические лигнины можно рассматривать как полимеры, полученные в результате гидролиза или делигнификации древесины (в щелочной либо кислой среде). Спектр адсорбционной активности лигнина включает токсины экзо- и эндогенной природы, аллергены, ксенобиотики, тяжелые металлы, радионуклиды, аммиак, двухзарядные катионы. Опыт клинического применения лигнина, в т. ч. с целью выведения токсичных металлов, приведен в монографии [8]. Также известно, что лигниновые сорбенты довольно успешно использовались в период чернобыльской катастрофы в зоне радиоактивного заражения [7]. К настоящему времени энтеросорбенты на основе лигнинов («Полифепан», «Лигносорб», «Фильтрум», «Лактофильтрум») прошли клиническую апробацию в различных медицинских учреждениях для лечения большого количества заболеваний и их осложнений [7].

Соли альгиновых кислот (альгинаты), а также хитин и хитозан (ХТ) – это природные полимеры, получаемые из морских биоресурсов, которым в настоящее время наибольшее внимание уделяется фармацевтическими учреждениями, а также при разработке лекарств или в области исследований, связанных с медициной. Альгинаты производят из бурых морских водорослей. Благодаря способности связывать и выводить из организма радионуклиды, тяжелые металлы и различные токсины альгинаты применяют в качестве сорбентов, наиболее распространенным среди которых является лекарственный препарат «Альгисорб» [17]. Кроме этого, способность адсорбировать воду позволяет использовать альгинатные гидрогели в качестве средств для достижения гемостаза и местного лечения ран, в т. ч. хронических незаживающих [11, 16]. Хитин – главный компонент панцирей ракообразных и насекомых, по структуре идентичен целлюлозе. Дезацетилированное производное хитина – ХТ – связывает токсины, соли тяжелых металлов, желчные кислоты, благоприятно влияет на липидный обмен [22, 23, 25]. Так, клинические испытания пленочных образцов ХТ показали высокую эффективность при заживлении ожоговых ран II–III А, Б степеней [1]. Однако в силу своих физико-химических свойств перечисленные биополимеры мало пригодны для получения пористых сорбентов с удовлетворительными прочностными и морфологическими характеристиками. Решением стало получение 2-компонентных АМ, сочетающих жесткость и контролируемую пористость с многообразием сорбционных свойств.

Синтез АМ, как правило, включает несколько стадий: получение гидрогеля, его созревание, обмен растворителя в порах геля и сушку с использованием сверхкритического диоксида углерода (СК-СО₂), в результате которой происходит диффузионное замещение органического растворителя внутри геля на СК-СО₂ [2]. Формируются прочные фазовые контакты, при этом изменения в структуре геля становятся необратимыми [4, 20, 21]. В связи со сказанным ключевой стадией синтеза пористых матриц на основе биополимеров является построение прочного каркаса гидрогеля, поскольку от этого зависит способность материала противостоять усадочным напряжениям в процессе сушки [21].

Перспективным способом получения гидрогелей является метод интерполимерного комплексообразования [12, 19]. В результате взаимодействия противоположно заряженных полиэлектролитов (ПЭ) формируется интерполиэлектролитный комплекс (ИПЭК) – дисперсная фаза, когда поры заполнены дисперсионной средой, каркас будущего АМ [4, 19–21]. На стадии синтеза ИПЭК закладываются размерные и структурные характеристики АМ, которые в дальнейшем определяют пространственную структуру и физико-химические свойства АМ (впитывающая способность, диффузионные свойства, химическое взаимодействие). Благодаря указанным свойствам данные материалы могут служить универсальной матрицей, удовлетворяющей требованиям к получению на ее основе сорбционных материалов медицинского назначения. Следует отметить, что до недавнего времени данных о сорбционно-структурных свойствах 2-компонентных АМ практически не было.

В настоящей работе мы провели сравнительное изучение сорбционных свойств АМ, полученных на основе пар биополимеров различной структурной организации: лигносульфоната натрия со сверхразветвленной структурой; альгината натрия и ХТ – с линейной. Преимуществом разветвленных ПЭ является возможность создания высокой локальной плотности заряда и, соответственно, получения на их основе компактных ИПЭК, а далее порошковых АМ, основным свойством которых является наличие развитой внутренней пористости. На основе ПЭ линейной структурной организации получают полимерные сорбенты волокнистой структуры. Их характеризует высокая эластичность, развитая система транспортных пор, что значительно увеличивает площадь взаимодействия материала и жидкости и напрямую влияет на сорбционную емкость.

Цель – исследование структурно-сорбционных свойств АМ на основе биополимеров различной структурной организации и оценка возможности дальнейшего использования данных АМ для энтеро- и аппликационной сорбции.

Объекты и методы исследования

В работе использовали лигносульфонат натрия (ЛСNa) с молекулярной массой (ММ) 67 кДа, полученный в результате сульфитной делигнификации древесины ели на ОАО «Группа «Илим» в г. Коряжма. Очистку образца от низкомолекулярных примесей проводили методом ультрафильтрации на лабораторной установке типа ФМ 02-1000 с перемешиванием [3]. ХТ (ООО «Био-прогресс», Московская обл.) получен из панцирей крабов, протонирован в 2%-й уксусной кислоте, ММ – 150 кДа. Альгинат натрия (АЛNa), АО «Архангельский опытный водорослевый комбинат», выделен из бурых водорослей

Белого моря, ММ – 70 кДа. Подробные характеристики образцов ЛСNa, ХТ и АЛNa приведены в работе [19].

ИПЭК получали смешением водного раствора анионоактивного ЛСNa (АЛNa) и уксуснокислого раствора катионоактивного ХТ при различных мольных соотношениях. Расчет мольного состава реакционной смеси (моль/моль) проводили по формуле

$$Z = \frac{C_{\text{ХТ}}^{\text{см}}}{C_{\text{АЛNa(ЛСNa)}}^{\text{см}}},$$

где $C^{\text{см}}$ – мольные концентрации ПЭ в смеси.

АМ получены при эквимольном соотношении ПЭ ($\text{NH}_3^+/\text{COOH}(-\text{SO}_3^-) = 1,0$) [19]. Далее водная фаза в структуре ИПЭК была заменена на органическую – ацетон (х.ч.). Образцы высушивали в токе CO_2 , находящемся в сверхкритическом состоянии: температура – 40 °С, давление – 10 МПа, скорость потока – 1 мл CO_2 /мин, – на установке MV-10ASFE (Waters, США) [18]. Продолжительность сушки составляла 12 ч.

Определение ζ -потенциала водных дисперсий ИПЭК осуществляли методом электрофореза, размера частиц – методом динамического светорассеяния на приборе Nanopartica Sz-100 (Horiba, Япония).

Влагопоглощение материалов изучали гравиметрическим методом в дистиллированной воде. Материалы погружали в чашу с раствором, накрывали крышкой и выдерживали в термостате при температуре 37 °С. Образцы перед взвешиванием промокали фильтровальной бумагой. Результаты оценивали по показателю степени набухания (г/г), который рассчитывали по формуле

$$q = \frac{m_2 - m_1}{m_1},$$

где m_1, m_2 – масса аэрогеля до и после набухания соответственно, г.

Электронно-микроскопические исследования АМ. Снимки образцов получали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Sigma VP Zeiss (Швейцария) с ускоряющим напряжением 10 кВ и детектором InLens. Для повышения контрастности снимков на поверхность образцов с помощью устройства Q150TES (Quorum Technologies, Германия) наносили платиново-палладиевое покрытие толщиной до 5 нм.

Снимки образцов на атомно-силовом микроскопе (АСМ) MultiMod 8 (Bruker Corp., Германия) выполняли с помощью кантилевера Veeco (Si модифицированный Sb), жесткость зонда – 62 Н/м, частота колебаний – 354 кГц. Режим сканирования – PeakForce.

Параметры пористой структуры синтезированных материалов получали методом низкотемпературной адсорбции азота (77,4 К) на анализаторе удельной поверхности ASAP 2020 MP (Micromeritics, США). Образец предварительно подвергали дегазации при 90 °С в течение 2 ч до остаточного давления 0,6...0,7 МПа. Навеска образцов для анализа составляла 50±5 мг. Обработку полученных изотерм проводили с использованием различных расчетных методов: расчет удельной поверхности, суммарного объема пор и средней ширины пор выполняли по методу Брунауэра–Эммета–Тейлора (БЭТ); t-plot метод использовали для определения площади поверхности мезопор и оценки объема микропор; методы Horvath–Kawazoe (НК) и Баррета–Джойнера–Халенда

(ВН) применяли для оценки распределения пор по размерам (для микро- и мезопор соответственно). Объем мезопор находили по разности суммарного объема сорбирующих пор и объема микропор. Погрешность измерения составила 0,5 %.

Сорбционные свойства АМ оценивали статическим методом. Определение остаточного содержания красителей метиленового голубого (МГ) и конго красного (КК) проводили колориметрическим методом, а катионов Cu(II), Ni(II), Co(II) и Hg(II) – методом комплексонометрического титрования по общепринятым методикам [13]. Сорбционную емкость АМ (мг/г) рассчитывали по формуле

$$\Gamma = \frac{(C - C_{\text{равн}})V}{m},$$

где C и $C_{\text{равн}}$ – концентрации вещества в объеме раствора до и после адсорбции, мг/л; V – объем раствора адсорбтива, взятого для контактирования с АМ, л; m – масса АМ, г.

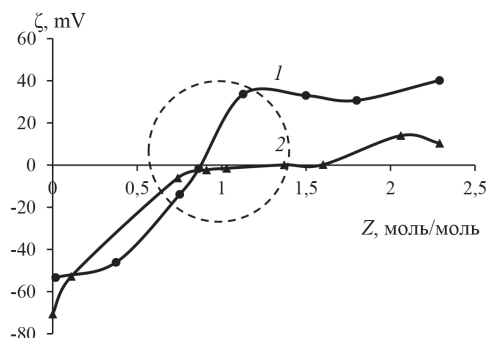
Результаты исследования и их обсуждение

Гидрогели представляют собой 3-мерную сетчатую структуру, состоящую из сшитых макромолекул полимеров и обладающую способностью поглощать растворы большого объема. В зависимости от структуры и вида сушки гидрогели могут быть получены в форме пленки, порошка или каркасного аэрогеля [19]. Один из методов сшивки биополимеров – метод интерполимерного комплексообразования, на эффективность которого влияют различные факторы: структура и степень ионизации ПЭ, природа функциональных групп, рН среды, силы межмолекулярных взаимодействий и т. д. Как правило, структурные переходы в подобных реакциях объясняются не только электростатическими (кулоновскими) взаимодействиями противоположно заряженных функциональных групп полимеров, но и кооперативной системой Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий и водородных связей [6].

Морфология ИПЭК в значительной степени определяется структурой и конформацией взаимодействующих пар ПЭ в растворе [5]. Линейный жесткоцепной биополимер ХТ обладает гелеобразующими и флокулирующими свойствами, а образующийся ИПЭК эквимольного состава ЛСNa–ХТ выделяется в виде мелкодисперсного гелеобразного осадка – матрицы. Причиной возникновения таких структур является адсорбция макромолекул флокулянта на нескольких частицах комплекса с формированием между ними полимерных мостиков, что приводит к более полному отделению осадка от жидкой фазы (ζ -потенциал водной дисперсии ИПЭК ЛСNa–ХТ эквимольного состава имеет небольшой положительный заряд, что иллюстрирует рис. 1). В результате получается рыхлый агрегат – флокула, в которой частицы не имеют непосредственного контакта между собой. АЛNa и ХТ – полимеры с линейной цепью и большим количеством гидроксильных групп. В области составов, близких к стехиометрии (значение ζ -потенциала приближается к 0), протекает кооперативная полиэлектролитная реакция, которая также сопровождается образованием ИПЭК. Гель созревает в течение суток. Гели получают непрозрачными, молочно-белого цвета.

Рис. 1. Зависимость электрокинетического потенциала водных дисперсий ИПЭК ЛСNa–ХТ (1) и АЛNa–ХТ (2) от мольного соотношения компонентов в смеси

Fig. 1. Dependence of electrokinetic potential of aqueous dispersions of IPEC LSNa–CT (1) and ALNa–CT (2) on the molar ratio of components in the mixture



Контроль процесса формирования ИПЭК ЛСNa–ХТ и АЛNa–ХТ был произведен методом АСМ. Анализ топографии поверхности ИПЭК, полученных при эквимолярном соотношении противоположно заряженных ПЭ, показал, что структура ИПЭК зависит от конформационного состояния формирующих их ПЭ (рис. 2 а, б). В результате проведенных исследований предложены 2 упаковочные модели формирования структуры ИПЭК: АЛNa–ХТ и ЛСNa–ХТ. Первая модель – это блочная структура, которая формируется за счет образования ионных связей между карбоксильными группами АЛNa и аминогруппами ХТ, а также кооперативной системы водородных связей и дисперсионных взаимодействий. Вторая модель – это агрегационно-трубчатая структура, которая получается за счет образования ионных связей между сульфогруппами в составе палочкообразных надмолекулярных структур ЛСNa и аминогруппами ХТ, а также водородных связей и дисперсионных взаимодействий. Следует отметить, что характерное для АЛNa расположение частиц блоками и наличие палочкообразных структур (трубок), характерное для ЛСNa, сохраняется в структуре ИПЭК АЛNa–ХТ и ЛСNa–ХТ соответственно [19].

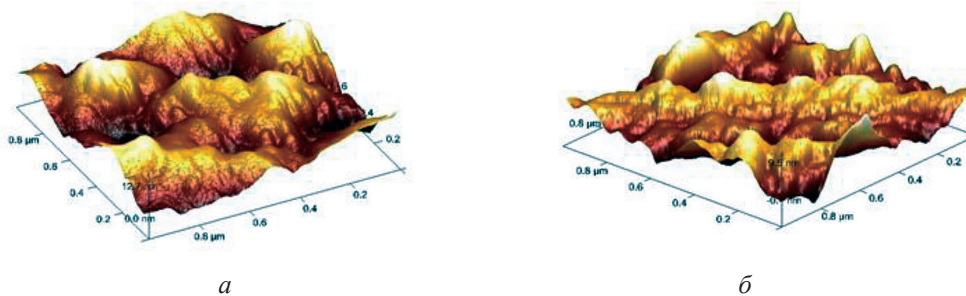


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности ИПЭК АЛNa–ХТ (а) и ЛСNa–ХТ (б)

Fig. 2. AFM-image of the surface of IPEC ALNa–CT (a) and LSNa–CT (b)

При высушивании дисперсий ИПЭК в СК-условиях получены 2-компонентные АМ. Внешне образец аэрогеля АЛNa–ХТ представляет собой волокнистый материал белого цвета в виде монолита, АМ состава ЛСNa–ХТ имеет вид мелкодисперсного порошка коричневого цвета.

Согласно СЭМ-исследованиям, образец АЛNa–ХТ имеет внутреннюю сложную многоуровневую структурную организацию: состоит из хаотически расположенных нанообъектов (фрагменты фибрилл) шириной 15...20 нм и длиной 50...80 нм, собранных в конгломераты различного размера, между которыми просматриваются пустоты, формирующие свой-

ственную данному образцу ажурную морфологию поверхности (рис. 3, *a*). Аэрогельные наноматериалы ЛСNa–ХТ (рис. 3, *б*) визуализируются как однородные по форме структурные элементы (частицы сферической формы), средний размер которых составляет 30...55 нм.

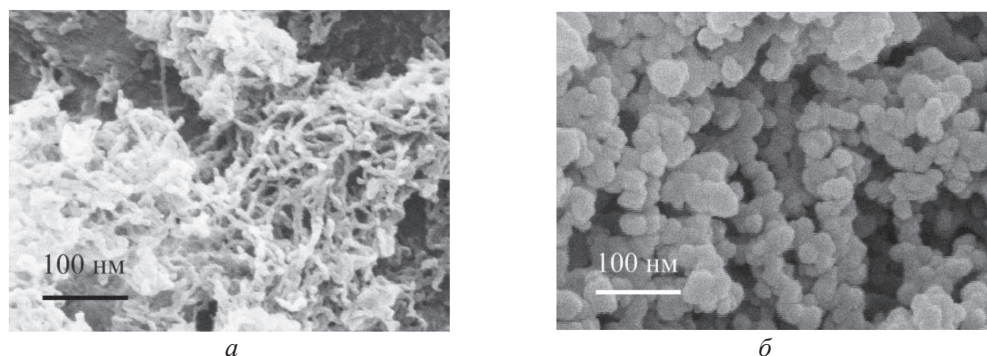


Рис. 3. Электронные микрофотографии АМ: *a* – АЛNa–ХТ; *б* – ЛСNa–ХТ

Fig. 3. Electronic micrographs of AM: *a* – ALNa–CT; *б* – LSNa–CT

Адсорбционно-структурные исследования показали, что АМ имеют развитую микро- и мезопористую структуру. Сравнительные результаты, характеризующие параметры пористой структуры АМ АЛNa–ХТ и ЛСNa–ХТ, приведены в таблице.

Параметры пористой структуры АМ ЛСNa–ХТ и АЛNa–ХТ

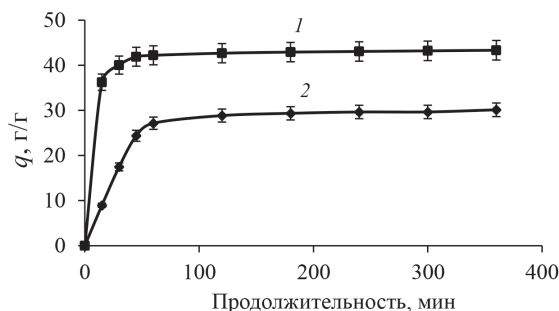
Parameters of the porous structure of AM LSNa–CT and ALNa–CT

АМ	Удельная поверхность, м ² /г			Общий объем пор, см ³ /г	Средний размер пор, нм
	общая	микропор	мезопор		
ЛСNa–ХТ	101±5	2±1	99±5	0,27±0,02	10,7±0,8
АЛNa–ХТ	260±15	11±4	249±13	1,24±0,12	20,2±1,9

Процесс набухания является самопроизвольным физическим (диффузионным) процессом, обусловленным развитой микро- и мезопористой структурой АМ. Полиэлектролитная природа АМ, высокая удельная поверхность, развитая микро- и мезопористая структура, значительное водопоглощение, широкий диапазон рН-устойчивости дают возможность применения новых 2-компонентных АМ для целей энтеро- и аппликационной сорбции.

При контакте с водной средой образец АМ ЛСNa–ХТ быстро и полностью диспергируется с образованием взвеси, что приводит к увеличению площади поверхности адсорбции воды, а образец АЛNa–ХТ сохраняет формуустойчивость, что объясняется различием структуры двух этих образцов. Кинетику набухания АМ изучали весовым методом. Модельной средой являлась дистиллированная вода. Представленные на рис. 4 результаты свидетельствуют о высокой скорости набухания образцов АЛNa–ХТ, при этом максимальное водопоглощение АМ АЛNa–ХТ (43 г/г) выше в 1,4 раза, чем ЛСNa–ХТ (30 г/г). Высокая сорбционная емкость АМ по отношению к воде позволяет отнести полученные материалы к суперадсорбентам.

Рис. 4. Кинетика влагопоглощения АМ: АЛNa–ХТ (1) и ЛСNa–ХТ (2)
 Fig. 4. Moisture absorption kinetics of AMs: ALNa–CT (1) and LSNa–CT (2)

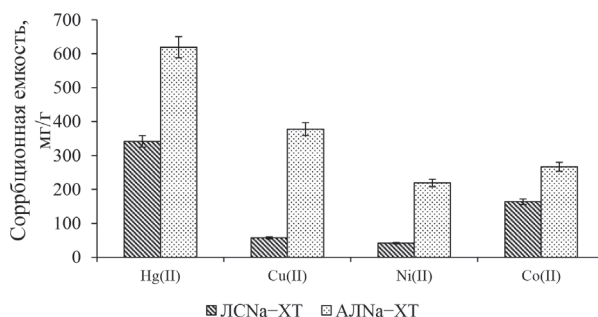


Таким образом, различная структурная организация АМ влияет на влагопоглощение и, соответственно, на их сорбционные свойства по отношению к тяжелым металлам и низкомолекулярным токсинам. Известно, что металлы поступают в живые организмы с водой, пищевыми продуктами и вдыхаемым воздухом. Распространение вышеперечисленных загрязнителей в окружающей среде обусловлено как геохимическими процессами, так и промышленным производством. В условиях увеличения техногенной нагрузки на окружающую среду применение энтеросорбентов позволяет восстанавливать, поддерживать и регулировать нормальное функционирование организма человека и животных.

В качестве модельных веществ (адсорбтивов) использовали ионы Cu(II), Ni(II), Co(II) и Hg(II). Сравнительные результаты определения статической сорбционной емкости АМ представлены на рис. 5.

Рис. 5. Сорбционная емкость АМ АЛNa–ХТ и ЛСNa–ХТ к ионам тяжелых металлов: Hg(II), Cu(II), Ni(II) и Co(II)

Fig. 5. Sorption capacity of AM ALNa–CT and LSNa–CT to heavy metal ions: Hg(II), Cu(II), Ni(II), Co(II)



Наличие различных функциональных групп ПЭ в составе ИПЭК, развитая пористая структура ИПЭК определяют различные механизмы сорбции металлов: ионный обмен, комплексообразование, хемосорбцию и физическую сорбцию. АМ АЛNa–ХТ проявляют особое сродство и селективность к катионам меди: сорбционная емкость по отношению к этим катионам составляет 378 мг/г, а эффективность сорбции – 100 % (рис. 5). Следует отметить, что медицинский препарат «Альгисорб» совершенно неэффективен по отношению к меди [15]. Наблюдаемое различие в сорбционной емкости к ионам тяжелых металлов Cu(II), Ni(II), Co(II) и Hg(II) АМ АЛNa–ХТ в сравнении с АМ ЛСNa–ХТ связано, по-видимому, с их разной надмолекулярной структурой и коррелирует с несопадающими значениями удельной поверхности и суммарного объема пор (см. таблицу). Кроме того, плотность адсорбционных центров выше у линейной пары АЛNa–ХТ.

В качестве моделей эндотоксинов и органических соединений средней (от 10 до 20 кДа) и низкой (до 900 Да) ММ использовали красители КК и МГ соответственно, выбор которых обусловлен их широким применением для оценки адсорбционных свойств пористых материалов и простотой определения [10, 18]. Эксперименты, проведенные на модельных системах, свидетельствуют о высокой скорости и эффективности адсорбционного действия изучаемых АМ. Предельная адсорбция по МГ составила 626 мг/г для АЛNa-ХТ и 213 мг/г для ЛСNa-ХТ (рис. 6), что сопоставимо с сорбционной активностью промышленных активных углей медицинского назначения [9]. Следует отметить, что сорбционная емкость АМ относительно МГ значительно выше, чем для КК (образцы ИПЭК получены при эквимольном соотношении противоположно заряженных функциональных групп ($\text{NH}_3^+/\text{-SO}_3^-$ (COOH^-) = 1,0)). Этот факт можно объяснить на основании сведений о том, что кислотно-основной индикатор МГ адсорбируется на активных центрах сорбентов как кислотного, так и основного характера, тогда как кислотный индикатор КК – на активных центрах преимущественно основного характера (АМ в своей структуре содержат химически связанный азот) [15, 18].

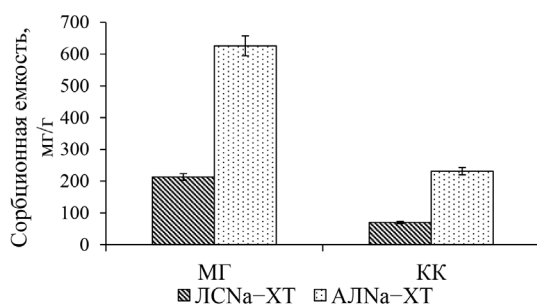


Рис. 6. Сорбционная емкость АМ АЛNa-ХТ и ЛСNa-ХТ к красителям МГ и КК

Fig. 6. Sorption capacity of AM ALNa-CT and LSNa-CT towards MB and CR dyes

Заключение

Таким образом, аэрогельные материалы, полученные по моделям «альгинат натрия – хитозан» и «лигносульфонат натрия – хитозан» характеризуются высокой сорбционной активностью по отношению к воде и широкому кругу маркеров, в т. ч. к тяжелым металлам и низкомолекулярным токсинам. Значительное увеличение сорбционной активности аэрогельных материалов «альгинат натрия – хитозан» в сравнении с «лигносульфонат натрия – хитозан» связано, по-видимому, с различной надмолекулярной структурой комплексов и аэрогельных материалов на основе каждой из названных моделей. Отмечена вся совокупность механизмов сорбции: намокание, всасывание, диффузия, осмотические явления и химическое взаимодействие. Полученные результаты показали, что исследуемые аэрогельные материалы обладают высокой адсорбционной активностью в отношении веществ-маркеров токсичных веществ и могут представлять интерес в качестве сорбентов (энтеросорбентов) в медицинской и ветеринарной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бузинова Д.А., Шиповская А.Б. Сорбционные и бактерицидные свойства пленок хитозана // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер.: Химия. Биология. Экология. 2008. Т. 8, № 2. С. 42–46.
Buzinova D.A., Shipovskaya A.B. Sorption and Bactericidal Properties of Chitosan Films. *Izvestiya Saratovskogo universiteta* = Bulletin of the Saratov University, 2008, vol. 8, Ser. Chemistry. Biology. Ecology, no. 2, pp. 42–46. (In Russ.).
2. Вальчук Н.А., Бровко О.С., Паламарчук И.А., Бойцова Т.А., Боголицын К.Г., Ивахнов А.Д., Чухчин Д.Г., Богданович Н.И. Получение материалов аэрогелевого типа на основе интерполимерного комплекса альгинат-хитозан с использованием сверхкритических флюидов // Сверхкрит. флюиды: теор. и практ. 2018. Т. 13, № 3. С. 83–89.
Valchuk N.A., Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A., Bogolitsyn K.G., Ivakhnov A.D., Chukhchin D.G., Bogdanovich N.I. Preparation of Aerogel Materials Based on Alginate-Chitosan Interpolymer Complex Using Supercritical Fluids. *Supercritical Fluids: Theory and Practice*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 83–89. (In Russ.).
3. Вишнякова А.П., Бровко О.С. Применение ультрафильтрации для очистки, концентрирования и фракционирования лигносульфонатов сульфитного щелока // Экология и пром-сть России. 2009. № 8. С. 37–39.
Vishnyakova A.P., Brovko O.S. Application of Ultrafiltration for Clearing, Concentration and Fractionating of Lignosulphonates of Sulfite Lye. *Ekologia i promyshlennost Rossii* = Ecology and Industry of Russia, 2009, no. 8, pp. 37–39. (In Russ.).
4. Горшкова Н.А., Бровко О.С., Паламарчук И.А., Ивахнов А.Д., Боголицын К.Г., Богданович Н.И., Чухчин Д.Г. Формирование надмолекулярной структуры композиционного аэрогеля на основе альгината натрия и хитозана // Сверхкрит. флюиды: теор. и практ. 2020. Т. 15, № 3. С. 11–20.
Gorshkova N.A., Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Ivakhnov A.D., Bogolitsyn K.G., Bogdanovich N.I., Chukhchin D.G. Formation of a Supramolecular Structure of a Composite Aerogel Based on Sodium Alginate and Chitosan. *Supercritical Fluids: Theory and Practice*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 11–20. (In Russ.).
5. Изумрудов В.А. Явления самосборки и молекулярного «узнавания» в растворах (био)полиэлектролитных комплексов // Успехи химии. 2008. Т. 77, № 4. С. 401–415.
Izumrudov V.A. Self-assembly and Molecular “Recognition” Phenomena in Solutions of (Bio)Polyelectrolyte Complexes. *Uspekhi himii* = Russian Chemical Reviews, 2008, vol. 77, no. 4, pp. 401–415. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n04ABEH003767>
6. Кабанов В.А. Полиэлектролитные комплексы в растворе и в конденсированной фазе // Успехи химии. 2005. Т. 74, № 1. С. 5–23.
Kabanov V.A. Polyelectrolyte Complexes in Solution and in Bulk. *Uspekhi himii* = Russian Chemical Reviews, 2005, vol. 74, no. 1, pp. 5–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC2005v074n01ABEH001165>
7. Конорев М.Р. Клиническая фармакология энтеросорбентов нового поколения // Вестн. фармации. 2013. № 4(62). С. 79–85.
Konorev M.R. Clinical Pharmacology of New Generation Enterosorbents. *Vestnik farmacii* = Bulletin of Pharmacy, 2013, vol. 4, no. 62, pp. 79–85. (In Russ.).
8. Леванова В.П. Лечебный лигнин. СПб.: Центр сорбц. технологий, 1992. 136 с.
Levanova V.P. *Therapeutic Lignin*. Saint Petersburg, Center for Sorption Technologies Publ., 1992. 136 p. (In Russ.).

9. Морозов А.С., Бессонов И.В., Нуждина А.В., Писарев В.М. Сорбенты для экстракорпорального удаления токсических веществ и молекул с нежелательной биологической активностью (обзор) // *Общ. реаниматология*. 2016. Т. 12, № 6. С. 82–107.
- Morozov A.S., Bessonov I.V., Nuzhdina A.V., Pisarev V.M. Sorbents for Extracorporeal Removal of Toxic Substances and Molecules with Undesirable Biological Activity (Review). *Obshchaya reanimatologiya = General Reanimatology*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 82–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2016-6-82-107>
10. Мухина О.Ю., Пискунова И.А., Лысенко А.А. Адсорбция красителя метиленового голубого активированными углеродными волокнами // *Журн. приклад. химии*. 2003. Т. 76, № 6. С. 926–930.
- Mukhina O.Yu., Piskunova I.A., Lysenko A.A. Sorption of Methylene Blue Dye by Activated Carbon Fibers. *Zurnal prikladnoy khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 2003, vol. 76, no. 6, pp. 926–930. (In Russ.). <https://doi.org/10.1023/A:1026311606910>
11. Олтаржевская Н.Д., Коровина М.А., Кричевский Г.Е., Щедрин М.А., Егорова Е.А. Возможности применения полисахаридов при лечении ран // *Раны и раневые инфекции*. Журн. им. проф. Б.М. Костюченка. 2019. Т. 6, № 2. С. 24–31.
- Oltarzhevskaya N.D., Korovina M.A., Krichevsky G.E., Shchedrina M.A., Egorova E.A. Possibilities of Using Polysaccharides in the Treatment of Wounds. *Rany i ranevye infekcii = Wounds and Wound Infections*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 24–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.25199/2408-9613-2019-6-2-24-31>
12. Паламарчук И.А., Макаревич Н.А., Бровко О.С., Бойцова Т.А., Афанасьев Н.И. Кооперативные взаимодействия в системе лигносульфонат-хитозан // *Химия раст. сырья*. 2008. № 4. С. 29–34.
- Palamarchuk I.A., Makarevich N.A., Brovko O.S., Boitsova T.A., Afanasiev N.I. Cooperative Interactions in the Lignosulfonate-Chitosan System. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material*, 2008, no. 4, pp. 29–34. (In Russ.).
13. Пришибил Р. Комплексоны в химическом анализе / под ред. Ю.Ю. Лурье. М.: Иностран. лит., 1960. 580 с.
- Prshibil R. *Complexones in Chemical Analysis*. Moscow, International Literature Publ., 1960. 580 p. (In Russ.).
14. Смирнов В.М. Аэрогели // *Успехи физ. наук*. 1987. Т. 152, № 5. С. 133–157.
- Smirnov V.M. Aerogels. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in the Physical Sciences*, 1987, vol. 152, no. 5, pp. 133–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0152.198705e.0133>
15. Тунакова Ю.А., Мухаметшина Е.С., Шмакова Ю.А. Оценка сорбционной емкости биополимерных сорбентов на основе лигнина в отношении металлов // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2011. № 9. С. 74–79.
- Tunakova Yu.A., Mukhametshina E.S., Shmakova Yu.A. Evaluation of the Sorption Capacity of Biopolymer Sorbents Based on Lignin in Relation to Metals. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2011, no. 9, pp. 74–79. (In Russ.).
16. Швецов И.С. Аппликационные гемостатические средства. Возможности и перспективы альгината натрия и хитозана // *Соврем. наука: актуал. проблемы теории и практики*. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2021. № 5. С. 230–235.
- Shvetsov I.S. Application Hemostatic Agents: Possibilities and Prospects of Sodium Alginate and Chitosan. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice*. Ser. Natural and Technical Sciences, 2021, no. 5, pp. 230–235. (In Russ.). <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.05.35>

17. Ali F.M., Boviery M.A. Adsorption Characteristics of Wheat Bran Towards Heavy Metal Cations. *Separation and Purification Technology*, 2004, vol. 38, iss. 3, pp. 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.11.005>
18. Alzaydien A.S. Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto a Low-Cost Natural Jordanian Tripoli. *American Journal of Environmental Sciences*, 2009, vol. 5, iss. 3, pp. 197–208. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2009.197.208>
19. Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A., Bogolitsyn K.G., Valchuk N.A., Chukhchin D.G. Influence of the Conformation of Biopolyelectrolytes on the Morphological Structure of Their Interpolymer Complexes. *Macromolecular Research*, 2015, vol. 23, iss. 11, pp. 1059–1067. <https://doi.org/10.1007/s13233-015-3140-z>
20. Gorshkova N., Brovko O., Palamarchuk I., Bogolitsyn K., Ivakhnov A. Preparation of Bioactive Aerogel Material Based on Sodium Alginate and Chitosan for Controlled Release of Levomycetin. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, vol. 32, iss. 9, pp. 3474–3482. <https://doi.org/10.1002/pat.5358>
21. Gorshkova N., Brovko O., Palamarchuk I., Bogolitsyn K., Bogdanovich N., Ivakhnov A., Chukhchin D., Arkhilin M. Formation of Supramolecular Structure in Alginate/Chitosan Aerogel Materials during Sol-Gel Synthesis. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2020, vol. 95, iss. 1, pp. 101–108. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05309-9>
22. Murata Y., Kodama Y., Hirai D., Kofuji K., Kawashima S. Properties of an Oral Preparation Containing a Chitosan Salt. *Molecules*, 2009, vol. 14, no. 2, pp. 755–762. <https://doi.org/10.3390/molecules14020755>
23. Murata Y., Kudo S., Kofuji K., Miyamoto E., Kawashima S. Adsorption of Bile Acid by Chitosan-Orotic Acid Salt, and Its Application as an Oral Preparation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 2004, vol. 52, iss. 10, pp. 1183–1185. <https://doi.org/10.1248/cpb.52.1183>
24. Pierre A.C., Pajonk G.M. Chemistry of Aerogels and Their Applications. *Chemical Reviews*, 2003, vol. 34, iss. 4, pp. 4243–4266. <https://doi.org/10.1002/chin.200304237>
25. Shahidi F., Abuzaytoun R. Chitin, Chitosan, and Co-Products: Chemistry, Production, Applications, and Health Effects. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2005, vol. 49, pp. 93–135. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(05\)49003-8](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(05)49003-8)

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



Научная статья

УДК 630*182:581.55

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-204-214

Динамика нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных сосновых ценозах Красноярской лесостепи

И.А. Гончарова^{1,2}, канд. биол. наук, науч. сотр.;

ResearcherID: [AAF-6890-2019](https://orcid.org/0000-0002-3495-9979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-9979>

Л.Н. Скрипальщикова¹, канд. биол. наук, доц., ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

А.П. Барченков¹, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>


¹Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, обособленное подразделение Красноярского научного центра СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; iagoncharova007@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, alexbarchenkov@mail.ru

²Красноярский краевой краеведческий музей, ул. Дубровинского, д. 84, г. Красноярск, Россия, 660049; iagoncharova007@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.21 / Одобрена после рецензирования 21.09.21 / Принята к печати 27.09.21

Аннотация. Изучена динамика нижних ярусов растительного покрова в антропогенно трансформированных ценозах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в период 2017–2020 гг. Исследования проведены в разнотравной группе типов леса естественного происхождения в Красноярской лесостепной зоне. Древостои характеризуются I–IV классами бонитета, полнотой 0,5–0,9 и IV–VII классами возраста. На каждом объекте мониторинга на 30 учетных площадках размером 1 м² был изучен растительный покров: видовой состав, проективное покрытие, встречаемость видов, горизонтальная и вертикальная структура фитоценоза. Интенсивность изменения видового состава за 4-летний период выявлена с использованием коэффициента Серенсена–Чекановского. Видовое разнообразие оценено с применением индекса Шеннона, рекреационная трансформация живого напочвенного покрова – индекса синантропизации. По итогам исследования определен видовой состав подлеска и живого напочвенного покрова, описаны особенности его изменения в период 2017–2020 гг. На основе анализа изменения видового разнообразия, состава и проективного покрытия доминантов и содоминантов, количественного соотношения эколого-ценотических групп установлены стадии рекреационной трансформации напочвенного покрова. В результате увеличившейся рекреационной нагрузки стадия рекреационной трансформации растительного покрова изменилась: на пробной площади 1 – с ненарушенной на 1-ю (начальную) фазу I стадии (слабой трансформации), на пробной площади 3 – с 1-й на 2-ю (заключительную) фазу I стадии.

© Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П., 2023

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

Вследствие отсутствия антропогенного влияния на пробной площади 4 сохранился ненарушенный растительный покров, тогда как на пробных площадях 2 и 5 из-за постоянной рекреационной нагрузки оставалась отмеченная в 2017 г. 2-я фаза I стадии трансформации растительного покрова. Для снижения воздействия на нижние ярусы растительности под пологом сосновых насаждений (пробные площади 1–3) и сохранения ее видового разнообразия можно рекомендовать устройство специальной дорожно-тропиночной сети.

Ключевые слова: сосновые ценозы, живой напочвенный покров, нижний ярус растительного покрова, подлесок, видовой состав, рекреационная нагрузка, антропогенно нарушенные сосняки, Красноярский край

Благодарности: Работа выполнена в рамках базовых проектов фундаментальных исследований Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН № 0356-2021-0009 «Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири» и № 0287-2021-0008 «Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата».

Для цитирования: Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П. Динамика нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных сосновых ценозах Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 204–214. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-204-214>

Original article

Dynamics of Understorey Vegetation Cover in Anthropogenically Disturbed Pine Cenoses of Krasnoyarsk Forest-Steppe

Irina A. Goncharova^{1,2✉}, Candidate of Biology, Research Scientist;

ResearcherID: [AAF-6890-2019](https://orcid.org/0000-0002-3495-9979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3495-9979>

Larisa N. Skripalschikova¹, Candidate of Biology, Assoc. Prof., Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

Alexey P. Barchenkov¹, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”, ul. Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; iagoncharova007@mail.ru[✉], lara@ksc.krasn.ru, alexbarchenkov@mail.ru

²Krasnoyarsk Regional Museum of Local Lore, ul. Dubrovinskogo, 84, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; iagoncharova007@mail.ru[✉]

Received on June 25, 2021 / Approved after reviewing on September 21, 2021 / Accepted on September 27, 2021

Abstract. The dynamics of the understorey vegetation cover in anthropogenically transformed cenoses of common pine (*Pinus sylvestris* L.) in the period 2017–2020 was studied. The studies were conducted in a diverse herbaceous group of forest types of natural origin in the Krasnoyarsk forest-steppe zone. The forest stands are characterized by I–IV classes of bonitet, density 0.5–0.9 and IV–VII class of age. Vegetation cover was studied at each



monitoring site on 30 (1 m²) survey plots: species composition, projective cover, species occurrence, horizontal and vertical structure of phytocenosis. The intensity of change in species composition over a 4-year period was identified using the Serensen-Chekanovsky coefficient. Species diversity was assessed using Shannon index, recreational transformation of living ground cover – synanthropization index. Based on the results of the study, the species composition of the undergrowth and living ground cover was determined, and the features of its change in the period 2017–2020 were described. Based on the analysis of changes in species diversity, composition and projective cover of dominants and co-dominants, quantitative ratio of ecological and cenotic groups, the stages of recreational transformation of the ground cover were determined. As a result of the increased recreational load, the stage of recreational transformation of the vegetation cover changed: in sample area 1 from undisturbed to the 1st (initial) phase I stage (weak transformation), in sample area 3 – from the 1st to the 2nd (final) phase I stage. Due to the absence of anthropogenic influence, the undisturbed vegetation cover was preserved in sample area 4, whereas in sample areas 2 and 5, due to the constant recreational load, the 2nd phase I stage of vegetation cover transformation observed in 2017 remained. To reduce the impact on the lower tiers of vegetation under the canopy of pine plantations (sample areas 1–3) and to preserve its species diversity, it is possible to recommend the arrangement of a specific road-trail network.

Keywords: pine cenoses, living ground cover, understorey of vegetation cover, undergrowth, species composition, recreational load, anthropogenically disturbed pine forests, Krasnoyarsk region

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the basic projects of fundamental research of the V.N. Sukachev Forest Institute SB RAS (No. 0356-2021-0009) “Functional and dynamic indication of biodiversity of Siberian forests”, (No. 0287-2021-0008) “Natural and anthropogenic dynamics of taiga forests of Central Siberia under changing climate”.

For citation: Goncharova I.A., Skripalschikova L.N., Barchenkov A.P. Dynamics of Understorey Vegetation Cover in Anthropogenically Disturbed Pine Cenoses of Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 204–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-204-214>

Введение

В лесных фитоценозах, произрастающих в зонах антропогенного влияния урбанизированных территорий, отмечены различные виды трансформации растительного покрова [12–22] как результат воздействия комплекса техногенных и рекреационных факторов. Проведенное ранее исследование [3] показало, что произрастающие в Красноярской лесостепи сосновые насаждения в настоящий момент подвержены трансформации в большей степени из-за рекреационного, чем из-за техногенного воздействия. Рекреационное влияние на лесные фитоценозы по своей интенсивности непрерывно изменяется во времени [5, 7, 8, 11, 21, 22]. Учитывая этот факт, мониторинг растительного покрова является актуальной задачей для исследования состояния нарушенных лесных фитоценозов.

Цель – изучение динамики нижних ярусов растительного покрова в антропогенно трансформированных сосновых ценозах Красноярской лесостепи в период 2017–2020 гг.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены на мониторинговых пробных площадях (ПП) в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) естественного происхождения в Красноярской лесостепной зоне. Изученные сосняки произрастают на разном удалении от г. Красноярска в зонах концентрации промышленного и рекреационного влияний (для сравнения – в фоновых условиях) и характеризуются IV–VII классами возраста, наиболее распространенной является разнотравная группа типа леса. Описание древесного яруса, подлеска и живого напочвенного покрова приведено в табл. 1, 2. ПП 1 и 2 находятся в 10 км к юго-востоку от г. Красноярска. ПП 3 располагается в 30 км от города в северо-восточном направлении. Сосновые ценозы (ПП 1–3) с 40-х гг. прошлого столетия произрастают в условиях значительных техногенной (концентрации загрязняющих веществ в атмосфере выше предельно допустимых уровней) и рекреационной нагрузок. На ПП 4 в сосняке в 40 км от города антропогенное воздействие носит единичный случайный характер. ПП 5 расположена в 100 км к северу от г. Красноярска в окрестностях пос. Юкеево, испытывает рекреационную и пасквальную нагрузки. В изучаемый период количество крупного рогатого скота, пасущегося на исследуемой ПП, изменялось мало, составляя около 150 голов. Прогон и выпас крупного рогатого скота на ПП осуществлялся с периодичностью примерно 1 раз в 7–10 дн.

В августе 2017–2020 гг. в сосновых фитоценозах ежегодно изучали растительный покров по общепринятым методикам [1, 10] с закладкой 30 постоянных учетных площадок размером 1 м² на каждой ПП. Интенсивность изменения видового состава оценивали с использованием коэффициента Серенсена–Чекановского (K_{sc}), видовое разнообразие – с применением индекса Шеннона, рекреационную трансформацию живого напочвенного покрова – с использованием индекса синантропизации [4]. Стадии трансформации подразделяли в соответствии с рассчитанным индексом синантропизации ($K_{син}$) [11]:

I – стадия слабой трансформации, $K_{син} = 1...20$ %:

а – 1-я (начальная) фаза, $K_{син} = 1...10$ %,

б – 2-я (заключительная) фаза, $K_{син} = 11...20$ %;

II – стадия умеренной трансформации, $K_{син} = 21...40$ %:

$K_{син}$ для фаз а и б равен 21...30 и 31...40 % соответственно;

III – стадия средней трансформации, $K_{син} = 41...60$ %:

$K_{син}$ для фаз а и б – 41...50 и 51...60 % соответственно;

IV – стадия сильной трансформации, $K_{син} = 61...80$ %:

$K_{син}$ для фаз а и б – 61...70 и 71...80 % соответственно;

V – стадия очень сильной трансформации, $K_{син} = 81...100$ %:

$K_{син}$ для фаз а и б – 81...90 и 91...100 % соответственно.

Статистический анализ данных проводили в программе Excel.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационная характеристика сосновых насаждений
Silvicultural and taxation characteristics of pine stands

ПП	Состав древостоя	Тип леса	Класс возраста	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Класс бонитета	Относительная полнота
1	10С	Осочково-разнотравно-зеленомошный	IV	28,7	23	III	0,9
2	10СедБ	Разнотравно-осочковый	IV	31,4	22	IV	0,7
3	10С	Разнотравно-осочково-зеленомошный	VI	39,3	16	III	0,5
4	10СедБ	Разнотравно-зеленомошный	VII	45,3	27	I	0,7
5			IV	34,5	30	Ia	

Таблица 2

Характеристика растительного покрова
Vegetation cover characteristics

ПП	Подлесок		Травяно-кустарничковый ярус		Мохово-лишайниковый покров	
	Проективное покрытие, %	Доминанты	Проективное покрытие, %	Доминанты	Проективное покрытие, %	Доминанты
1	70	<i>Cotoneaster melanocarpus</i> Fisch. ex Blytt	50	<i>Thalictrum foetidum</i> L., <i>Carex macroura</i> Meish., <i>Rubus saxatilis</i> L.	20	<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.
2	30	<i>C. melanocarpus</i> , <i>Rosa acicularis</i> Lindl.	70	<i>C. macroura</i> , <i>Polygonatum odoratum</i> (Mill.) Druce, <i>Vicia unijuga</i> A. Br.	15	<i>P. schreberi</i>
3	80	<i>C. melanocarpus</i> , <i>Viburnum opulus</i> L., <i>Swida alba</i>	50	<i>C. macroura</i> , <i>R. saxatilis</i> L., <i>V. unijuga</i>	60	<i>P. schreberi</i> , <i>Hylacomium splendens</i> (Hedw.) Schimp.
4	15	<i>R. acicularis</i> , <i>Padus avium</i>	60	<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth, <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	90	<i>P. schreberi</i> , <i>H. splendens</i> , <i>Rhytidadelphus triquetrus</i> (Hedw.) Warnst.
5			70	<i>Carex macroura</i> , <i>Pyrola rotundifolia</i> L., <i>R. saxatilis</i>	60	<i>H. splendens</i> , <i>P. schreberi</i>

Результаты исследования и их обсуждение

III 1. По данным исследования 2017 г., растительный покров на ПП насчитывал 20 видов (табл. 3), индекс Шеннона составлял 1,6 (рис. 1, а). Тропиночная сеть отсутствовала. В данном фитоценозе зафиксирована гнездоцветка клубочковая (*Neottianthe cucullata* (L.) Schlechter), вид, внесенный в Красную книгу Красноярского края [6], имеющий статус 3(R) – редкий. На ПП индекс синантропизации равен 0 (рис. 1, б), следовательно, можно предположить, что, невзирая на присутствие следов рекреации, этот фактор в 2017 г. только начинал влиять и его воздействие проявлялось в незначительной степени, фитоценоз являлся ненарушенным и характеризовался естественной растительностью.

Таблица 3

Число видов растительности на пробных площадях 1–5
The number of vegetation species in the plots 1–5

Год	ПП				
	1	2	3	4	5
2017	20	44	32	53	54
2018	25		30		56
2019			37		59
2020	48	44	54		

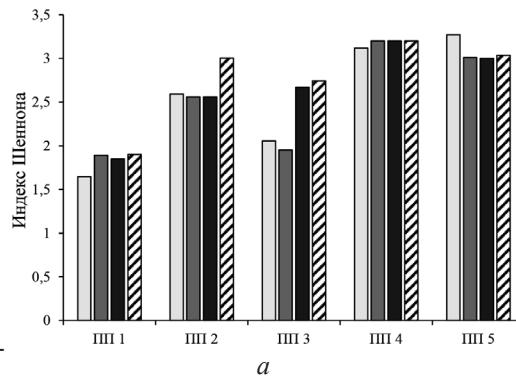
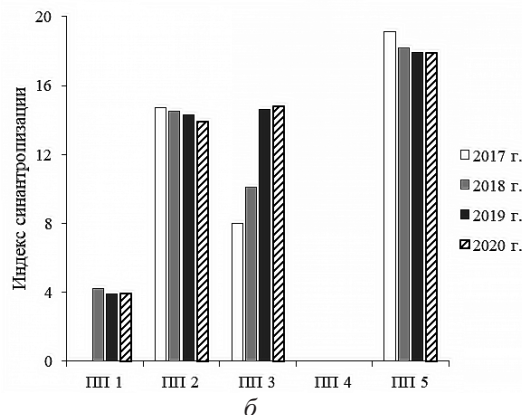


Рис. 1. Индексы Шеннона (а) и синантропизации (б) в сосновых ценозах

Fig. 1. Shannon indexes (a) and synanthropization (b) in pine cenoses



За 4-летний период на ПП отмечены значительные изменения в видовом составе (коэффициент сходства между видовым составом при описании 2017 и 2020 гг. составляет 0,71). С 2018 г. в непосредственной близости от сосняка на-

чалось активное коттеджное строительство, в связи с чем антропогенный пресс увеличился. Площадь тропинойной сети выросла до 10 % от общей площади сосняка. В 2018 г. индекс Шеннона изменился с 1,6 до 1,9, что обусловлено внедрением синантропных видов, индекс синантропизации – с 0 до 4. Эти данные свидетельствуют о резко повысившейся за год рекреационной нагрузке. Установлено, что за период 2018–2020 гг. сократилось проективное покрытие живого напочвенного покрова при $F = 56,33$ и $p = 0,01$ (рис. 2). Виды, малоустойчивые к уплотнению почвы [13] (*Polygonatum odoratum*, *Vicia unijuga*), уменьшили свое проективное покрытие ($p < 0,05$), тогда как виды, относительно устойчивые к вытаптыванию (*Calamagrostis arundinacea*, *Thalictrum foetidum*), – увеличили ($p < 0,01$). В 2019–2020 гг. видовой состав не претерпевал столь сильных изменений, как в 2018 г. (видовой состав, индексы Шеннона и синантропизации существенно не изменялись). Изложенное позволяет говорить о том, что, несмотря на возросшую рекреационную нагрузку, состояние растительного покрова стабилизировалось на I-а стадии трансформации [11].

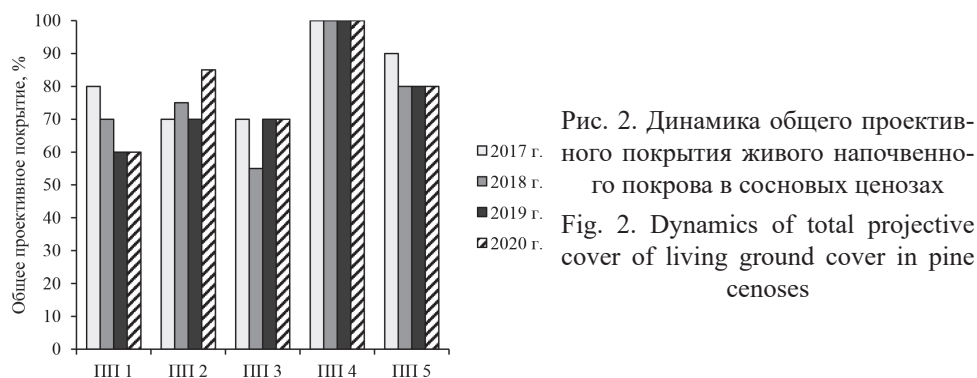


Рис. 2. Динамика общего проективного покрытия живого напочвенного покрова в сосновых ценозах
Fig. 2. Dynamics of total projective cover of living ground cover in pine cenoses

III 2. В 2017 г. площадь тропинойной сети составляла 3 %. Растительный покров насчитывал 44 вида, индекс Шеннона составлял 2,6, индекс синантропизации – 14,7 (рис. 1), т. е. фитоценоз находился на I-б стадии трансформации. В фитоценозе произрастают охраняемые виды, относящиеся к семейству орхидных: башмачок крупноцветковый (*Cypripedium macranthon* Sw.) и настоящий (*C. calceolus* L.), по 2 клона, статус 2(V) – уязвимый вид, сокращающий численность, а также *Neottianthe cucullata*.

За период наблюдений видовой состав растительного покрова изменился незначительно ($K_{sc} = 0,91$). Необходимо отметить, что до 2019 г. площадь тропинойной сети возросла до 5 % от общей площади сосняка, видовой состав (табл. 3) и проективное покрытие основных доминантов напочвенного покрова, индексы Шеннона и синантропизации достоверно не изменились. Однако снижение проективного покрытия с 25 до 10 % такого малоустойчивого к вытаптыванию вида, как *Vicia unijuga*, может свидетельствовать о повышении рекреационной нагрузки.

В 2020 г. площадь тропинойной сети сократилась до 1 %, видовой состав травяно-кустарничкового яруса пополнился растениями, относящимися к лесостепной группе и группе лесного разнотравья [2, 9]. Индекс Шеннона возрос от 2,6 до 3,0. Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова увеличилось (рис. 2) при $F = 6,9$ и $p < 0,05$, но проективное покрытие и встречаемость

его основных доминантов остались прежними. Индекс синантропизации достоверно не изменился. Возросло присутствие охраняемых видов: *Cypripedium macranthon* – 7 клонов, *C. calceolus* – 6 клонов. По сравнению с предыдущими годами исследований количество отмеченных клонов видов *Cypripedium sp.* увеличилось в 3 раза, что можно объяснить введенным на территории Красноярского края режимом самоизоляции, при котором рекреанты не посещали лесные массивы в фазу цветения башмачков, не вытаптывали напочвенный покров и не собирали цветы на букеты. Таким образом, можно заключить, что в данном фитоценозе рекреационное воздействие по своей интенсивности в 2020 г. уменьшилось, однако растительный покров продолжает находиться на I-б стадии трансформации.

III 3. В 2017 г. площадь тропиной сети составляла 1 %; в растительном покрове насчитывалось 32 вида, индекс Шеннона составлял 2,1, индекс синантропизации – 8,0 (рис. 1), т. е. фитоценоз находился на I-а стадии трансформации. В сосняке в большом количестве отмечен подлежащий охране вид *Neottianthe cucullata*. Сходство видового состава при исследованиях 2017 и 2020 гг. характеризовалось $K_{sc} = 0,84$. На территории исследуемого бора в 2018 г. проведена санитарная рубка. Вопреки установленным правилам, порубочные остатки не были утилизированы, в местах их размещения проективное покрытие живого напочвенного покрова резко уменьшилось (рис. 2), площадь тропиной сети возросла до 3 % от всей территории древостоя. Индекс видового разнообразия снизился до 1,9. Также в 2018 г. отмечено сильное замусоривание ПП бытовыми отходами. Однако в 2019–2020 гг. общее проективное покрытие живого напочвенного покрова достигло значений 2017 г. (рис. 2), а индекс Шеннона превысил показатель этого года, достигнув значения 2,7.

За период 2017–2020 гг. отмечена тенденция увеличения площади тропиной сети (до 5 %), состав доминантов и содоминантов живого напочвенного покрова, их проективное покрытие и встречаемость не изменились, индекс синантропизации стал больше ($F = 8,1$ и $p < 0,05$). В напочвенном покрове зафиксирован рост проективного покрытия таких синантропных видов, как *Glechoma hederacea* L. и *Artemisia campestris* L. ($p < 0,05$), что может являться свидетельством повышения антропогенного воздействия. По результатам исследований 2020 г. фитоценоз находится на стадии трансформации I-б.

III 4. По данным исследования 2017 г., растительный покров на ПП насчитывал 53 вида (табл. 3), индекс Шеннона – 3,1 (рис. 1, а). В насаждении произрастали 2 охраняемых вида: *Cypripedium macranthon*, *C. guttatum* Sw – статус 3(R). Адвентивные виды не обнаружены (индекс синантропизации равен 0), фитоценоз можно считать ненарушенным, с естественной растительностью. За период 2017–2020 гг. видовой состав растительного покрова фактически остался неизменным ($K_{sc} = 0,99$). Тропиная сеть отсутствовала. Основные показатели живого напочвенного покрова – общее проективное покрытие, индекс Шеннона, состав, проективное покрытие и встречаемость доминантов и содоминантов, индекс синантропизации – не изменились. В 2020 г. в составе травяно-кустарничкового яруса единично был зафиксирован вид *Neottianthe cucullata*, не отмеченный ранее. Все перечисленное свидетельствует о том, что при исключении антропогенного воздействия на растительный покров интен-

сивность изменения видового состава минимальна. Фитоценоз продолжает оставаться ненарушенным и характеризоваться естественной растительностью.

III 5. В 2017 г. видовой состав растительного покрова включал 54 вида, индекс Шеннона составлял 3,3, индекс синантропизации – 19,1 (рис. 1). Площадь тропинойчной сети была 5 %. Фитоценоз находился в заключительной фазе стадии слабой трансформации (I-б) растительного покрова. За период 2017–2020 гг. флористический состав изменился мало ($K_{sc} = 0,95$). Площадь тропинойчной сети возросла до 7 %. Состав доминантов и содоминантов не изменился, однако под воздействием рекреационной и пасквальной нагрузок увеличилось проективное покрытие и встречаемость видов, относительно устойчивых к вытаптыванию (*Carex macroura*, *Poa annua* L., *Calamagrostis arundinacea*) – $p < 0,05$. Повышенная рекреационная и пасквальная нагрузки привели к уплотнению и иссушению почвы, вследствие чего на исследуемой территории сократили свое проективное покрытие виды, относящиеся к группе бореального мелкотравья (*Pyrola rotundifolia*, *Linnaea borealis* L., *Orthilia secunda* (L.) House) – при $p < 0,05$. Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова, индексы Шеннона и синантропизации существенно не изменились. В фитоценозе сохраняется отмеченная ранее I-б стадия трансформации.

Заключение

В результате 4-летних наблюдений за состоянием нижних ярусов растительного покрова (подлесок и живой напочвенный покров) в антропогенно нарушенных сосновых ценозах Красноярской лесостепи выявлены особенности их трансформации в результате варьирующего рекреационного (пробные площади 1–3) и пасквального (пробная площадь 5) воздействий.

Динамика характеристик растительного покрова: видового состава, проективного покрытия, встречаемости доминантов и содоминантов, количественного соотношения эколого-ценотических групп – свидетельствует, что в результате увеличившейся рекреационной нагрузки изменилась стадия рекреационной трансформации растительного покрова: на пробной площади 1 – с ненарушенной на I-а стадию, на пробной площади 3 – с I-а на I-б. Вследствие отсутствия антропогенного влияния на пробной площади 4 сохранился ненарушенный растительный покров, тогда как на пробных площадях 2 и 5 из-за постоянной рекреационной нагрузки по-прежнему наблюдается отмеченная в 2017 г. I-б стадия рекреационной трансформации растительного покрова.

Для снижения воздействия на нижние ярусы растительности под пологом сосновых насаждений пробных площадей 1–3 и сохранения видов рекомендуется организация специальной дорожно-тропинойчной сети. Благоустройство рекреационных лесов целесообразно проводить с использованием общепринятых рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).
2. Буторина Т.Н. Эколого-ценотический анализ кустарничково-травяного яруса лесных ассоциаций // Типы лесов Сибири. М.: АН СССР, 1963. С. 31–52.

Butorina T.N. Ecological-Cenotic Analysis of the Shrub-Grassy Layer of Forest Associations. *Siberian Forest Types*. Moscow, Academy of Sciences of the Soviet Union Publ., 1963, pp. 31–52. (In Russ.).

3. Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П. Видовой состав и запасы фитомассы напочвенного покрова в антропогенно нарушенных сосняках Красноярской лесостепи // Раст. ресурсы. 2019. Т. 55, № 3. С. 409–421.

Goncharova I.A., Skripalshikova L.N., Barchenkov A.P. Dynamics of Ground Vegetation Species Composition and Phytomass at Recreationally Disturbed Pine Forests in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Rastitelnye Resursy = Plant Resources*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 409–421. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0033994619030087>

4. Горчаковский П.Л. Антропогенные изменения растительности: мониторинг, оценка, прогнозирование // Экология. 1984. № 5. С. 3–16.

Gorchakovskij P.L. Anthropogenic Changes in Vegetation: Monitoring, Assessment, Forecasting. *Ecology*, 1984, no. 5, pp. 3–16. (In Russ.).

5. Ковязин В.Ф. Рекреационное лесоводство. СПб.: Лань, 2020. 380 с.

Kovyazin V.F. *Recreational Forestry*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2020. 380 p.

6. Красная книга Красноярского края: Растения и грибы. Красноярск: Поликом, 2005. 368 с.

Krasnoyarsk Krai Red Book: Plants and Mushrooms. Krasnojarsk, Polikom Publ., 2005. 368 p. (In Russ.).

7. Меланхолин П.Н. Изменение видового разнообразия травяно-кустарничкового яруса при различных антропогенных нагрузках на лесные экосистемы // Лесоведение. 2006. № 6. С. 52–58.

Melancholin P.N. Changes in the Species Diversity of the Grass-Dwarf Shrub Layer Under Various Anthropogenic Loads on Forest Ecosystems. *Lesovedenie = Forestry*, 2006, no. 6, pp. 52–58. (In Russ.).

8. Меланхолин П.Н. Изменение травяного покрова при снижении рекреационной нагрузки в подмосковном лесопарке // Лесоведение. 2014. № 4. С. 50–55.

Melancholin P.N. Changes in Grass Cover Under Reduced Recreational Load in a Forest Park Near Moscow. *Lesovedenie = Forestry*, 2014, no. 4, pp. 50–55. (In Russ.).

9. Назимова Д.И., Дробушевская О.В., Данилина Д.М., Коновалова М.Е., Кофман Г.Б., Бугаева К.С. Биоразнообразие и динамика низкогорных лесов Саян: региональный и локальный уровни // Разнообразие и динамика лесных экосистем России / под ред. А.С. Исаева: в 2 кн. Кн. 1. Гл. 3. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2012. С. 131–172.

Nazimova D.I., Drobushevskaja O.V., Danilina D.M., Konovalova M.E., Kofman G.B., Bugaeva K.S. Biodiversity and Dynamics of Low-Mountain Sayan Forests: Regional and Local Levels. Ed. by Isaev A.S. *Diversity and Dynamics of Forest Ecosystems in Russia*. Moscow, KMK Press, 2012, vol. 1, pp. 131–172. (In Russ.).

10. Программа и методика биогеоценологических исследований / отв. ред. Н.В. Дылис. М.: Наука, 1974. 403 с.

Program and Methods of Biogeocenological Studies. Ed. by Dylis N.V. Moscow, Nauka Publ., 1974. 403 p. (In Russ.).

11. Прокопьев Е.П., Рыбина Т.А. Опыт мониторинга синантропизации и антропогенной трансформации растительного покрова особо охраняемых природных территорий г. Томска // Вестн. ТомГУ. Биология. 2010. № 3(11). С. 109–118.

Prokopyev E.P., Rybina T.A. Experience of Monitoring Synanthropization and Anthropogenic Transformation of Vegetation of Specially Protected Areas in Tomsk. *Bulletin of Tomsk state University. Biology*, 2010, vol. 3, iss. 11, pp. 109–118. (In Russ.).

12. Рысин Л.П., Рысин С.Л. Урболесоведение. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2012. 240 с.

Rysin L.P., Rysin S.L. *Urban Forest Science*. Moscow, KMK Press, 2012. 240 p. (In Russ.).

13. Таран В.Н., Спиридонов В.Н. Устойчивость рекреационных лесов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 179 с.
Taran V.N., Spiridonov V.N. *Stability of Recreational Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 179 p. (In Russ.).
14. Brown J.H., Kalisz S.P., Wright W.R. Effects of Recreational Use on Forested Sites. *Environmental Management*, 1977, vol. 1, pp. 425–431. <https://doi.org/10.1007/BF01866999>
15. Chandrashekara U.M., Muraleedharan P.K., Sibichan V. Anthropogenic Pressure on Structure and Composition of a Shola Forest in Kerala, India. *Journal of Mountain Science*, 2006, vol. 3, iss. 1, pp. 58–70. <https://doi.org/10.1007/s11629-006-0058-0>
16. Chernen'kova T.V. Biodiversity of Forest Vegetation under Industrial Pollution. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, iss. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1134/S1067413614010044>
17. Dulamsuren Ch., Hauck M., Mühlenberg M. Vegetation at the Taiga Forest-Steppe Borderline in the Western Khentey Mountains, Northern Mongolia. *Annales Botanici Fennici*, 2005, vol. 42, no. 6, pp. 411–426.
18. Mudrák O., Frouz J., Velichová V. Understory Vegetation in Reclaimed and Unreclaimed Post-Mining Forest Stands. *Ecological Engineering*, 2010, vol. 36, iss. 6, pp. 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.02.003>
19. Osumi K. Reciprocal Distribution of Two Congeneric Trees, *Betula platyphylla* var. *Japonica* and *Betula maximowicziana*, in a Landscape Dominated by Anthropogenic Disturbances in North-Eastern Japan. *Journal of Biogeography*, 2005, vol. 32, iss. 12, pp. 2057–2068. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01368.x>
20. Otoda T., Sakamoto K., Hirobe M., Undarmaa J., Yoshikawa K. Influences of Anthropogenic Disturbances on the Dynamics of White Birch (*Betula platyphylla*) Forests at the Southern Boundary of the Mongolian Forest-Steppe. *Journal of Forest Research*, 2013, vol. 18, iss. 1, pp. 82–92. <https://doi.org/10.1007/s10310-011-0324-z>
21. Sturtevant B.R., Zollner P.A., Gustafson E.J., Cleland D.T. Human Influence on the Abundance and Connectivity of High-Risk Fuels in Mixed Forests of Northern Wisconsin, USA. *Landscape Ecology*, 2004, vol. 19, iss. 3, pp. 235–253. <https://doi.org/10.1023/B:LAND.0000030420.87498.f7>
22. Zvereva E., Toivonen E., Kozlov M.V. Changes in Species Richness of Vascular Plants under the Impact of Air Pollution: a Global Perspective. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, vol. 17, iss. 3, pp. 305–319. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00366.x>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2023 г.

Мерзленко М.Д. «Лесному журналу» – 190 лет: вехи истории и значимость журнала. № 2-9

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of Plus Trees of Scots Pine by Xylem Conditions. № 4-9

Feklistov P.A., Sobolev A.N., Babich N.A., Sungurova N.R., Melekhov V.I., Bolotov I.N. Edge Effect in Pine Stands in the Northern Taiga. № 2-26

Govedar Z., Prokhorova N., Babić V., Dukić V., Kanjevac B., Daničić V., Bilić S. Natural Regeneration on Deadwood in the Primeval Forest Janj. № 5-90

Jagdag D., Batsaikhan G., Baatarbileg N., Lobanov A.I., Gerelbaatar S. Effect of Nutrient Substrate on Seedling Growth and Biomass Allocation of *Picea obovata* Ledeb. in Northern Mongolia. № 6-57

Агеев А.А., Салцевич Ю.В., Буряк Л.В. Комплексное применение биостимуляторов при выращивании семян ели (*Picea obovata* L.). № 2-73

Барзут О.С., Сурсо М.В. Радиальный рост ели (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) в условиях горных разработок. № 2-58

Вайс А.А., Варакин Г.С., Мамедова С.К., Ануев Е.А., Герасимова О.А. Детрит в высокополнотных сосновых насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири. № 3-9

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Костина Е.Э., Жигунов А.В. Сибсовое потомство карельской березы на

Заонежской лесосеменной плантации. № 5-9

Галдина Т.Е., Чернодубов А.И., Михайлова М.И. Внутривидовое разнообразие *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи. № 3-84

Данилов Д.А., Яковлев А.А., Суворов С.А., Крылов И.А., Корчагов С.А., Хамитов Р.С. Формирование надземной фитомассы листовых пород на постагrogenных землях. № 1-65

Данчева А.В., Залесов С.В. Формирование рубками ухода биологически устойчивых сосняков защитного назначения в Северном Казахстане. № 1-9

Дерюгин А.А., Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б. Динамика структуры популяции ели под пологом березняков южной тайги и смешанных лесов в европейской части России. № 2-15

Егоров А.Б., Павлюченкова Л.Н., Постников А.М., Бубнов А.А. Выращивание березы на вырубках с применением гербицидов. № 5-58

Ермакова М.В., Стеценко С.К., Андреева Е.М. Влияние высокоактивных соединений на механические свойства древесины двухлетних сеянцев сосны обыкновенной в лесных питомниках. № 1-88

Ильинов А.А., Раевский Б.В. Микросателлитные локусы в генетической оценке плюсовых деревьев *Pinus sylvestris* L. № 3-48

Исаева Л.Г., Ершов В.В., Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А. Интродукция кедра и лиственницы в условиях Кольского Заполярья. № 4-41

- Карпечко А.Ю., Синькевич С.М.** Влияние реконструктивной рубки в лиственненно-еловом древостое на корневую конкуренцию пород. № 3-99
- Козыкин А.В., Наквасина Е.Н.** ГИС-анализ влияния типа землепользования на современное разнообразие лесонасаждений в национальном парке «Кенозерский». № 5-27
- Котельников Р.В., Мартынюк А.А.** Математическая оценка достоверности информации о лесных пожарах. № 3-21
- Кухта А.Е., Максимова О.В., Кузнецова В.В.** Воздействие климатических факторов на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на побережье Кандалакшского залива Белого моря. № 4-105
- Лебедев В.М., Лебедев Е.В., Сорочупов В.Н., Ларионов М.В.** Корневое питание, фотосинтез и чистая первичная продукция у древостоев рода *Picea* на уровне организма в пределах российского ареала. № 1-38
- Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А.** Оценка отклика на изменение климата в опытах с происхождениями *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) на севере Русской равнины. № 1-22
- Острошенко В.Ю., Острошенко Л.Ю.** Влияние стимуляторов на всхожесть семян и рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). № 4-93
- Примаков Н.В.** Состояние защитных лесных насаждений Азовского побережья Краснодарского края. № 1-77
- Пристова Т.А., Федорков А.Л., Новаковский А.Б.** Надземная фитомасса древостоя в экспериментальных культурах сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми. № 6-31
- Раевский Б.В., Ильинов А.А., Медведева М.В., Рудковская О.В.** Система мониторинга природной динамики лесного массива заповедника «Костомукшский». № 6-81
- Ребко С.В., Мельник П.Г., Козел А.В., Поплавская Л.Ф., Тупик П.В., Носников В.В.** Сравнительная оценка физико-механических свойств древесины различных климатических типов сосны обыкновенной. № 4-26
- Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Зайцева М.И., Нелеева К.Г.** Морфометрические критерии оценки качества контейнерных сеянцев хвойных пород. № 5-42
- Самсонова И.Д.** Ресурсный потенциал медоносных растений степного Придонья. № 1-51
- Сергеева Ю.А., Долмоного С.О.** Применение *Ooencyrtus kuvanae* Howard против непарного шелкопряда. № 3-69
- Сирман Д.Ю.** Всхожесть семян хвойных интродуцентов в условиях Центрального Казахстана при различной стратификации и внесении в субстрат хвойного опада. № 1-100
- Соболев А.Н., Феклистов П.А., Неверов Н.А., Макаров С.С.** Относительная высота деревьев в изолированных популяциях сосновых древостоев. № 6-102
- Стасова В.В., Скрипальщикова Л.Н., Астраханцева Н.В., Барченков А.П.** Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии. № 3-35
- Сурина Е.А., Минин Н.С.** Эффективность рубок ухода в лиственненно-еловых насаждениях в северной подзоне европейской части России. № 5-103
- Танцырев Н.В., Санников С.Н., Усольцев В.А.** Географические особенности возобновления *Pinus sibirica* Du Tour. № 6-44
- 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. № 4-58

Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Парамонов А.А., Давыдов А.В. Возрастная динамика нормальных древостоев ольхи серой таежной зоны северо-востока европейской части России. № 6-70

Турчина Т.А., Банникова О.А. Создание лесных культур сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) на бугристых песках в степной зоне России. № 4-76

Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Евлаков П.М. Биоэнергетические и репродукционные насаждения настоящих тополей в Центральном Черноземье России. № 5-75

Фомин В.В., Иванова Н.С., Залесов С.В., Попов А.С., Михайлович А.П. Лесные типологии в Российской Федерации. № 6-9

Шавнин С.А., Юсупов И.А., Монтиле А.А., Голиков Д.Ю., Марина Н.В. Сезонная динамика содержания компонентов антиокислительной системы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне локального теплового воздействия. № 2-38

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

Будник П.В., Баклагин В.Н., Галлактионов О.Н. Лесоэксплуатационное районирование лесных субарктических территорий. № 6-114

Бургунутдинов А.М., Бурмистрова О.Н., Клевеко В.И., Лицингер Ю.К. Использование армогрунта в конструкции устоев деревянного моста лесовозной автомобильной дороги. № 3-113

Заикин А.Н., Сиваков В.В., Шевелева Е.В. Совершенствование конструкции цепных пильных аппаратов. № 1-116

Макаренко А.В. Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке. № 4-120

Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Авдюхин А.В. Оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного автопоезда. № 3-126

Прокопец В.С., Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Пономарева Н.Г., Левушкин Д.М., Боровлев Ю.А. Математическое обоснование сопротивления движению автотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных дорог. № 2-106

Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ. № 2-88

Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Соколова В.А., Войнаш С.А., Арико С.Е. Применение канатно-рельсовых дорог для трелевки сортиментов. № 5-115

Уткин В.А., Матвеев С.А. Особенности проектирования деревянных мостов автомобильных лесовозных дорог. № 1-126

Хитров Е.Г., Должиков И.С., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом. № 5-126

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*). № 5-151

Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Острякова В.А. Структурно-механические свойства гидродинамически активированной

древесной массы в аддитивных технологиях. № 2-121

Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива. № 1-172

Мелехов В.И., Соловьев И.И. Формирование секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы. № 4-146

Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Герасимова М.М., Медведев С.О., Зырянов М.А. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков. № 1-153

Прокофьев Г.Ф., Коваленко О.Л. Усталостная прочность ленточных пил. № 4-136

Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Михайлова А.Е., Овчарова Е.О., Войнаш С.А. Силовой анализ процесса резания единичным зерном сферокоорунда при шлифовании древесины. № 3-140

Титунин А.А., Геворкян М.С., Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусова И.В. Научное обоснование использования древесины осины в деревянных клееных конструкциях. № 6-149

Торопов А.С., Бызов В.Е. Морфологический анализ и оптимизация технологического процесса продольного раскрытия круглых лесоматериалов. № 2-132

Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Гайсин И.Г. Оценка точности метода измерения сопротивления сверлению древесины в дендрохронологических исследованиях. № 5-135

Шамаев В.А., Медведев И.Н., Руссу А.В. Режимы пропитки сортиментов из древесины сосны маслянистыми антисептиками. № 6-136

Шамаев В.А., Шишлов О.Ф. Упрочнение и стабилизация форм и размеров древесины осины и тополя карданолом. № 3-155

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Бахтиярова А.В., Пименов С.Д., Сизов А.И. Гидролиз гемицеллюлоз древесины при ультранизких концентрациях серной кислоты. № 1-201

Бровко О.С., Паламарчук И.А., Горшкова Н.А., Богданович Н.И., Ивахнов А.Д. Сорбционно-структурные свойства аэрогельных материалов на основе биополимеров. № 6-190

Вашукова К.С., Терентьев К.Ю., Чухчин Д.Г., Ивахнов А.Д., Пошина Д.Н. Влияние топологической структуры целлюлозы на процессы ацетилирования и нитрования. № 6-176

Жирнов Д.Н., Дернова Е.В., Гораздова В.В., Дулькин Д.А. Зольность тарного картона. Проблемы и пути их решения. № 5-184

Иксанов Р.А., Канарский А.В., Канарская З.А., Гематдинова В.М., Белкина Е.В. Культивирование *Dunaliella salina* на питательной среде из нейтрально-сульфитных щелоков. № 6-162

Кхоа Х.М., Казаков Я.В., Окулова Е.О. Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле. № 2-146

Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагонепроходимого сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи. № 4-169

Прохоров Д.А., Дубовый В.К. Исследование влияния температурных режимов сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы. № 3-173

Сиваков В.П., Вураско А.В., Шерстобитов А.Л. Снижение колебаний массы бумаги в бумагоделательной машине. № 1-186

Сыпалова Ю.А., Шестаков С.Л., Кожевников А.Ю. Функциональный состав и структурные особенности лигнинов высших растений. № 5-164

Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В., Ващукова К.С. Поверхностная обработка картона суспензиями наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения. № 3-162

Шкуро А.Е., Глухих В.В., Усова К.А., Чирков Д.Д., Захаров П.С., Вураско А.В. Получение биокомпозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы с различной степенью ацетилирования. № 4-155

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Kovyazin V.F., Lepikhina O.Yu., Demidova P.M., Kolesnik O.A., Shobairi S.O.R., Nguyen A.T. Problems of Forest Resource Management in the Arctic Zone of the Russian Federation. № 3-185

Makarov S.S., Bagaev E.S., Chudetsky A.I., Kuznetsova I.B., Lebedeva O.P., Antonov A.M. Features of Triploid Aspen Clonal Micropropagation Using Modern Growth-Stimulating Preparations. № 2-183

Гаврилова О.И., Гостев К.В. Применение обработанной плазмой воды для подготовки семян хвойных пород к посеву. № 5-204

Гончарова И.А., Скрипальщикова Л.Н., Барченков А.П. Динамика нижних ярусов растительного покрова в антропогенно нарушенных сосновых ценозах Красноярской лесостепи. № 6-204

Грязькин А.В., Данилов Д.А., Зайцев Д.А., Хоанг Минь Ань, Тхань Чан Чунг. Регуляция соковыделения при подпочке березы *Betula pendula* Roth. № 4-180

Загородский М.А., Третьяков С.В., Коптев С.В. Плотность древесины сосны обыкновенной в осушаемом сосняке сфагновом. № 2-160

Клевцов Д.Н., Тюкавина О.Н. Запасы углерода в 40-летних культурах сосны обыкновенной. № 5-195

Коньшакова С.А., Булхов Н.А., Заикин А.Н., Кузнецов С.Г., Сиваков В.В. Оценка перспектив развития предприятий лесного хозяйства Республики Башкортостан. № 4-202

Паршина Е.И., Дымова О.В., Титов Е.В. Плантационное выращивание *Pinus sibirica* Du Tour в среднетаежной зоне Республики Коми. № 3-195

Подрезов Ю.В. Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций. № 2-172

Царев Е.М., Рукомойников К.П., Анисимов С.Е., Конюхова Т.А., Кренин А.В. Совершенствование технологии химического ухода в лесонасаждениях. № 4-190

Черник Д.В., Авдеева Е.В., Черник К.Н., Ровных Н.Л. Анализ воздействия ветровой нагрузки на каркас теплицы для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой. № 2-195