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

2024

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

2024

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

Н.П. Братилова, Р.Н. Матвеева, О.Ф. Буторова, М.В. Гришлова. Географическая изменчивость показателей роста и репродуктивного развития сосны кедровой сибирской..... 9

М.А. Кириенко, Л.Н. Скрипальщикова, И.А. Гончарова. Состояние арборифлоры парка «Гвардейский» г. Красноярска..... 20

А.А. Вайс, Г.С. Вараксин, С.К. Мамедова, А.А. Андронова. Динамика биометрических и углеродных показателей сосновых насаждений на залежных землях Красноярской лесостепи..... 35

E.V. Robonen, N.P. Chernobrovkina, B.V. Raevsky, M.I. Zaitseva, K.G. Nelaeva. Double-Cropping of *Pinus sylvestris* L. Containerized Seedlings under Short Growing Season Conditions at High Latitudes..... 50

Н.А. Бабич, Е.Б. Карбасникова, О.С. Залывская, Ю.В. Александрова, Н.П. Гаевский, И.А. Попкова. Концептуальная модель интродукции дендрофлоры в северных широтах Русской равнины..... 66

M.U. Umarov, E.S. Chavchavadze, R.V. Shchekalev, V.O. Romanova, R.M. Umarov. Variability of Anatomical Characteristics of the Wood of Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the Conditions of the North Caucasus..... 78

Л.В. Ветчинникова, А.Ф. Титов, Т.Д. Татаринова. Жирнокислотный состав и активность ацил-липидных десатураз в почках березы повислой в зимне-весенний период в Карелии и Якутии..... 90

Г.Ю. Морозова. Жизнеспособность растений в условиях урбанизированной среды..... 106

А.Н. Соболев, П.А. Феклистов, И.Н. Болотов, С.С. Макаров, О.Н. Тюкавина, Ж.А. Бруева. Особенности структуры черничных ельников Большого Соловецкого острова..... 121

V.A. Savchenkova, S.B. Vasilyev, V.F. Nikitin. Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests..... 133

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Е.Г. Хитров, И.С. Должиков, О.А. Куницкая, В.П. Друзьянова, Д.В. Болотин, А.В. Андронов. Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов..... 147

V. Bandara, A. Alwis, T. Bandara, C. Muthumala, F. Marikar. Assessment of the Boron Treatability Level of Lesser-Known Timber Species by the Impregnation Method..... 160

В.И. Мелехов, И.И. Соловьев, Е.В. Сазанова, Н.Г. Пономарева. Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно..... 175

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

О.С. Бровко, М.Е. Нечаева, А.Д. Ивахнов, И.А. Паламарчук, Н.А. Горшкова, Н.И. Богданович. Аэрогели на основе диоксида кремния и лигносульфоната..... 184

В.В. Гораздова, Е.В. Дернова, Д.А. Дулькин. Стабилизация проклейки макулатурного тарного картона в процессе хранения..... 195

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

С.В. Коптев, С.А. Васькин. Фаутность еловых древостоев северо-таежного района Архангельской области..... 206

Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 2024 г. 216

CONTENTS

FORESTRY

N.P. Bratilova, R.N. Matveeva, O.F. Butorova, M.V. Grishlova. Geographical Variability of Growth and Reproductive Development Indicators of Siberian Cedar Pine..... 9

M.A. Kirienko, L.N. Skripal'shchikova, I.A. Goncharova. The Condition of Arboriflora of the Gvardejskij Park of Krasnoyarsk..... 20

A.A. Vais, G.S. Varaksin, S.K. Mamedova, A.A. Andronova. Dynamics of Biometric and Carbon Indicators of Pine Plantations Growing on the Abandoned Farmlands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe..... 35

E.V. Robonen, N.P. Chernobrovkina, B.V. Raevsky, M.I. Zaitseva, K.G. Nelaeva. Double-Cropping of *Pinus sylvestris* L. Containerized Seedlings under Short Growing Season Conditions at High Latitudes..... 50

N.A. Babich, E.B. Karbasnikova, O.S. Zalyvskaya, Yu.V. Aleksandrova, N.P. Gaevskiy, I.A. Popkova. The Conceptual Model of Dendroflora Introduction in the Northern Latitudes of the Russian Plain..... 66

M.U. Umarov, E.S. Chavchavadze, R.V. Shchekalev, V.O. Romanova, R.M. Umarov. Variability of Anatomical Characteristics of the Wood of Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the Conditions of the North Caucasus..... 78

L.V. Vetchinnikova, A.F. Titov, T.D. Tatarinova. The Fatty Acid Composition and the Activity of Acyl-Lipid Desaturases in the Buds of Silver Birch in Winter-Spring Period in Karelia and Yakutia..... 90

G.Yu. Morozova. Plant Viability in an Urbanized Environment..... 106

A.N. Sobolev, P.A. Feklistov, I.N. Bolotov, S.S. Makarov, O.N. Tyukavina, Z.A. Brueva. Features of the Structure of Blueberry Spruce Forests of Bolshoy Solovetsky Island..... 121

V.A. Savchenkova, S.B. Vasilyev, V.F. Nikitin. Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests..... 133

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

E.G. Khitrov, I.S. Dolzhikov, O.A. Kunitskaya, V.P. Druzyanova, D.V. Bolotin, A.V. Andronov. Modeling the Process of Adhesion of the Propeller to the Soil Taking into Account the Pitch of the Grousers..... 147

V. Bandara, A. Alwis, T. Bandara, C. Muthumala, F. Marikar. Assessment of the Boron Treatability Level of Lesser-Known Timber Species by the Impregnation Method..... 160

V.I. Melekhov, I.I. Solovev, E.V. Sazanova, N.G. Ponomareva. Improving the Performance of Band Saws by Local Thermophysical Effects on the Blade..... 175

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

O.S. Brovko, M.E. Nechaeva, A.D. Ivakhnov, I.A. Palamarchuk, N.A. Gorshkova, N.I. Bogdanovich. Aerogels Based on Silicon Dioxide and Lignosulfonate..... 184

V.V. Gorazdova, E.V. Dernova, D.A. Dulkin. Stabilization of Sizing of Wast-Paper Containerboard during Storage..... 195

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

S.V. Koptev, S.A. Vaskin. The Defectiveness of Spruce Stands in the Northern Taiga Zone of the Arkhangelsk Region..... 206

Index of Articles Published in the Russian Forestry Journal in 2024..... 216

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья
УДК 630*228.7:582.47
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-9-19

Географическая изменчивость показателей роста и репродуктивного развития сосны кедровой сибирской

Н.П. Братилова, д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.; *ResearcherID: AAF-3074-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2918-9690*
Р.Н. Матвеева, д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.; *ResearcherID: AAB-9159-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3476-9622*
О.Ф. Буторова✉, д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.; *ResearcherID: AAB-9155-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8575-7464*
М.В. Гришлова, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID: KMX-6247-2024, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6438-1477*
Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; nbratilova@yandex.ru, matveevarn@mail.ru, Butorova.olga@mail.ru✉, grishlova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.24 / Одобрена после рецензирования 08.04.24 / Принята к печати 11.04.24

Аннотация. Изучение роста и репродуктивной способности древесных растений в новых условиях местообитания, сравнительная оценка и отбор потомств популяций способствуют повышению эффективности создаваемых из этих растений плантаций. Исследование проведено с целью установления влияния географического происхождения материнских насаждений сосны кедровой сибирской на рост и семеношение ее семенного потомства алтайского (зона оптимума ареала), лениногорского и ярцевского экотипов. Материнские насаждения расположены от 50°12′ с. ш. (лениногорское происхождение) до 61°00′ с. ш. (ярцевское). Объект исследования – сосна кедровая сибирская 55-летнего возраста, произрастающая на плантации «Метеостанция» в пригородной зоне г. Красноярска. Измерены высота, диаметр ствола и кроны, ее протяженность, длина хвои, определены продолжительность жизни хвои, количество мутовок и ветвей в них, количество побегов с микростробилами и шишками, микростробилов и шишек на побеге и на дереве. Установлено, что средние высота деревьев и диаметр ствола различаются по вариантам на 9,3 и 16,6 % соответственно. Потомство алтайской популяции достоверно превышает другие по этим показателям. Протяженность кроны составляет 88,4–92,7 % от высоты дерева, объем кроны – 148,79–309,09 м^3 в зависимости от варианта. Хвоя на дереве в лениногорском варианте сохраняется до 3,4 года, в алтайском – 3,7 года, ярцевском – 4,7 года. По семенной продуктивности также выделяется потомство алтайского происхождения. Меньшим количеством шишек на дереве отличается ярцевский вариант. Определение пыльцевой продуктивности показало, что на дереве формируются по 14,5–23,1 шт. побегов с микростробилами. Превышение по количе-

© Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Гришлова М.В., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

ству шишек составляет до 299,0 % от среднего значения. Деревья отселектированы по семенной и пыльцевой продуктивности и рекомендуются для составления схем смешения при создании лесосеменных плантаций, при этом использовать лучше не только быстрорастущие, урожайные деревья, но и экземпляры-опылители, что будет способствовать повышению урожайности на лесосеменных плантациях.
Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, изменчивость, географическое происхождение, популяция, плантация, семеношение, Красноярск
Благодарности: Исследование выполнено коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» в рамках госзадания № FEFE-2024-0013 Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Селекционно-генетические основы формирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)».

Для цитирования: Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Гришлова М.В. Географическая изменчивость показателей роста и репродуктивного развития сосны кедровой сибирской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 9–19. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-9-19

Original article

Geographical Variability of Growth and Reproductive Development Indicators of Siberian Cedar Pine

Natalia P. Bratilova, *Doctor of Agriculture, Prof., Chief Research Scientist;*
ResearcherID: AAF-3074-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2918-9690
Rimma N. Matveeva, *Doctor of Agriculture, Prof., Chief Research Scientist;*
ResearcherID: AAB-9159-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3476-9622
Olga F. Butorova ✉***,*** *Doctor of Agriculture, Prof., Chief Research Scientist;*
ResearcherID: AAB-9155-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8575-7464
Mariya V. Grishlova, *Candidate of Agriculture, Research Scientist;*
ResearcherID: KMX-6247-2024, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6438-1477
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety "Krasnoyarskiy rabochiy", 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; nbratilova@yandex.ru, matveevarn@mail.ru, Butorova.olga@mail.ru✉, grishlova@mail.ru

Received on January 25, 2024 / Approved after reviewing on April 8, 2024 / Accepted on April 11, 2024

Abstract. The study of the growth and reproductive capacity of woody plants in new habitat conditions, comparative assessment and selection of population progenies contribute to increasing the efficiency of plantations created from these plants. The study has been conducted in order to establish the influence of the geographical origin of the parent Siberian cedar pine stands on the growth and seed production of its seed progeny of the Altai (area optimum zone), Leninogorsk and Yartsevo ecotypes. The parent stands are located from 50°12′ N (the Leninogorsk origin) to 61°00′ N (the Yartsevo origin). The object of the study has been a 55-year-old Siberian cedar pine growing on the "Meteostation" plantation in the suburban area of Krasnoyarsk. The height, diameter of the stem and crown, the crown length and the length of the needles have been measured. The lifespan of needles, the number of whorls and branches in them, the number of shoots with microstrobilae and cones, as well as microstrobilae and cones on the shoot and on the tree have been determined. It has been

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

found that the average tree height and stem diameter differ between the variants by 9.3 and 16.6 %, respectively. The Altai population progeny significantly exceeds others in these indicators. The crown length is 88.4–92.7 % of the tree height, the crown volume is 148.79–309.09 m³, depending on the variant. The needles on the tree in the Leninogorsk variant last for up to 3.4 years, in the Altai variant – for up to 3.7 years, in the Yartsevo variant – for up to 4.7 years. In terms of seed productivity, the progeny of the Altai origin also stands out. The Yartsevo variant is distinguished by a smaller number of cones on the tree. The determination of pollen productivity has shown that 14.5–23.1 pcs. of shoots with microstrobilae are formed on the tree. The excess in the number of cones amounts to 299.0 % of the average value. The trees have been selected based on seed and pollen productivity and are recommended for drawing up mixing schemes when creating forest seed plantations, while it is better to use not only fast-growing, yielding trees, but also pollinating specimens, which will help increase yields on forest seed plantations.

Keywords: Siberian cedar pine, variability, geographical origin, population, plantation, seeding, Krasnoyarsk

Acknowledgements: The study was carried out by the staff of the "Breeding of Woody Plants" scientific laboratory within the framework of the state assignment no. FEFE-2024-0013 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic "Breeding and Genetic Foundations for the Formation of Target Plantations and Rational Use of Wood Resources of the Krasnoyarsk Territory (Yenisey Siberia)".

For citation: Bratilova N.P., Matveeva R.N., Butorova O.F., Grishlova M.V. Geographical Variability of Growth and Reproductive Development Indicators of Siberian Cedar Pine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 9–19. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-9-19

Введение

Наблюдение за ростом и репродуктивной способностью древесных растений в новых условиях произрастания, сравнение и отбор потомств популяций позволяют повысить эффективность создаваемых плантаций. Продуктивность потомств имеет высокую зависимость от места произрастания и генотипа материнских насаждений [2–4, 6, 15, 16, 18, 19].

Сравнение потомств из отдаленных популяций помогает не только выявить высокопродуктивные климатипы в ареале, но и размножать ценные отселектированные деревья. Географические культуры – это лесная искусственная лаборатория, выполняющая роль генного банка в сохранении биологического разнообразия. Они показывают вариабельность древесных растений тех географических зон, из которых были взяты образцы семян конкретных популяций и особей [8, 13, 14, 20, 21].

Географические культуры способствуют улучшению качества, экологического и санитарного состояния создаваемых древостоев. Биологическая и семенная продуктивность кедровых сосен зависит от их географической принадлежности [11, 12, 17, 22]. Исследованию роста и урожайности этого вида на лесокультурных объектах посвящены работы А.И. Ирошникова [9], С.Н. Велисевича и др. [5], М.Н. Казанцевой и М.М. Спасибовой [10] и др.

А.И. Ирошниковым [9], Н.А. Бабичем и др. [1] было установлено, что наилучшим ростом характеризуются потомства из оптимума произрастания вида. Отмечено существенное различие между популяциями контрастных регионов (в зависимости от лесорастительной зоны и высоты над уровнем моря)

по росту растений и формированию генеративных структур в географических культурах [11]. По данным А.И. Ирошникова [9], сосна кедровая сибирская обладает значительной нормой реакции на изменение экологических факторов, может хорошо адаптироваться к условиям произрастания в пределах ареала.

Исходя из вышеизложенного отбор экземпляров сосны кедровой сибирской в конкретных экологических условиях по целевому назначению с последующим их размножением для создания лесосеменных плантаций имеет большое значение.

Цель исследования – установить влияние географического происхождения материнских насаждений из зоны оптимума и контрастных точек ареала сосны кедровой сибирской на рост и репродуктивное развитие семенного потомства этих насаждений в условиях пригородной зоны Красноярска.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стало семенное потомство северной (ярцевской), южной (лениногорской) и произрастающей в оптимальных для сосны кедровой сибирской условиях (алтайской) популяций. К южной популяции сосны кедровой сибирской относится лениногорское насаждение, произрастающее в Казахстане; к северной – популяция из Ярцево Красноярского края. Популяции различаются и по высоте над уровнем моря (табл. 1).

Таблица 1

Происхождение материнских популяций сосны кедровой сибирской
The origin of parent populations of Siberian cedar pine

Популяция	Происхождение	Лесничество	Географические координаты		Высота над уровнем моря, м
			с. ш.	в. д.	
Алтайская	Алтайский край	Каракокшинское	51°50′	86°54′	700
Лениногорская	Казахстан	Лениногорское	50°12′	85°33′	1700
Ярцевская	Красноярский край	Ярцевское	61°00′	90°36′	100

Изучено влияние географического происхождения семян на рост 55-летних деревьев сосны кедровой сибирской. Исследование проведено в пригородной зоне Красноярска на плантации «Метеостанция», расположенной на территории Учебно-опытного лесхоза Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва. Растения размещены по схеме 5×5 м.

При селекционной оценке деревьев устанавливали высоту, диаметр ствола и кроны, протяженность последней, длину хвои, продолжительность ее жизни, количество мутовок и ветвей в них, количество побегов с микростробилами и шишками, микростробилов и шишек на побеге и на дереве. Ранжирование показателей проводили, оценивая лучшие растения по наибольшему баллу. Полученные данные обрабатывали статистически.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что средняя высота сосны кедровой сибирской составляет 14,0 м, варьируя по вариантам от 12,9 м (лениногорское происхождение) до 15,1 м

(потомство алтайской популяции). Высота потомства сосны кедровой сибирской алтайской популяции достоверно ($t_ф > t_{05}$) превышает другие на 7,1–17,1 % [7]. Показатель характеризуется низким уровнем варьирования (табл. 2).

Таблица 2

Высота и диаметр стволов сосны кедровой сибирской разного происхождения
The height and diameter of the stems of Siberian cedar pine trees of different origin

Происхождение	$M_{ср}$	±m	CV, %	$t_ф$ при $t_{05} = 2,02$	Уровень изменчивости
Высота, м					
Алтайское	15,1	0,18	5,3	–	Низкий
Лениногорское	12,9	0,37	9,1	5,35	
Ярцевское	14,1	0,36	8,1	2,48	
Диаметр ствола, см					
Алтайское	33,7	0,95	12,6	–	Средний
Лениногорское	28,9	1,38	15,0	2,87	
Ярцевское	32,5	1,92	18,7	0,56	

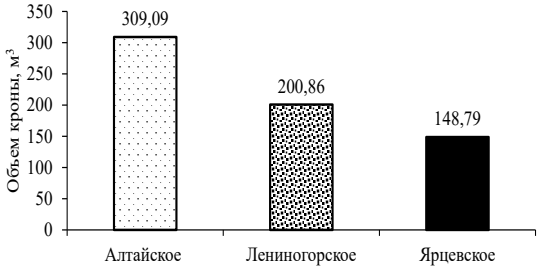
Средний диаметр ствола на высоте 1,3 м у 55-летней сосны кедровой сибирской составляет 31,7 см. Диаметр ствола в алтайском варианте, имеющий наибольшее значение, существенно превышает показатель в лениногорском варианте. Сравнение растений алтайского и ярцевского вариантов по диаметру ствола по t-критерию показало несущественное различие ($t_ф > t_{05}$). Коэффициент изменчивости более высокий в ярцевском варианте.

Диаметр кроны деревьев различается между вариантами на 22,8 % (табл. 3). Крона большего диаметра сформировалась у деревьев алтайского происхождения: на 11,9–38,9 % в сравнении с остальными; наименьшего – у потомства ярцевской популяции при среднем и высоком уровнях варьирования. Высокий уровень изменчивости характерен для деревьев ярцевского варианта [7]. Крона у сосны кедровой сибирской низкоопущенная, в среднем ее протяженность составляет 12,8 м – 88,4–92,7 % от высоты дерева. Объем кроны деревьев в разных вариантах варьировал от 148,79 до 309,09 м^3 с разницей между крайними значениями до 2,1 раза (см. рисунок). Наибольший объем кроны отмечен у деревьев алтайского происхождения. Слабее по сравнению со всеми вариантами развита крона у деревьев ярцевского происхождения.

Таблица 3

Диаметр и протяженность кроны сосны кедровой сибирской разного происхождения
The diameter and length of the crown of Siberian cedar pine trees of different origin

Происхождение	$M_{ср}$	±m	CV, %	$t_ф$ при $t_{05} = 2,02$	Уровень изменчивости
Диаметр кроны, м					
Алтайское	7,5	0,21	12,3	–	Средний
Лениногорское	6,7	0,27	13,0	2,34	
Ярцевское	5,4	0,42	24,4	4,47	Высокий
Протяженность кроны, м					
Алтайское	14,0	0,18	5,9	–	Низкий
Лениногорское	11,4	0,35	13,0	6,61	Средний
Ярцевское	13,0	0,36	8,8	2,48	Низкий



Объем кроны сосны кедровой сибирской в зависимости от происхождения семян

The crown volume of Siberian cedar pine trees depending on the origin of the seeds

По количеству живых мутовок на дереве уровни варьирования – средний и низкий (табл. 4). Количество мутовок с охвоенными побегами составляет в среднем 26,2 шт. при наибольшем показателе у потомства ярцевской популяции. Достоверное различие по данному показателю подтверждается t-критерием только между деревьями ярцевского и алтайского происхождений.

Таблица 4

Количество мутовок с охвоенными побегами у сосны кедровой сибирской разного происхождения, шт.

The number of whorls with needled shoots in Siberian cedar pine trees of different origin, pcs.

Происхождение	$M_{ср}$	±m	CV, %	$t_ф$ при t_{05} = 2,02	Уровень изменчивости
Алтайское	24,7	0,67	12,5	2,52	Средний
Лениногорское	26,2	0,77	12,4	1,23	
Ярцевское	27,8	1,03	11,7	–	Низкий

По количеству ветвей в мутовке при среднем значении 4,7 шт. лидирует потомство лениногорского происхождения, но достоверность различий между вариантами не подтверждается статистически.

Средняя длина хвои сосны кедровой сибирской сравниваемых вариантов – 10,8 см. Большей длиной хвои отличаются деревья алтайского происхождения, существенно превышая показатель потомства лениногорской популяции ($t_ф > t_{05}$). У некоторых экземпляров в алтайском варианте хвоя имеет длину 13,2–14,7 см (табл. 5).

Таблица 5

Длина и продолжительность жизни хвои сосны кедровой сибирской разного происхождения

The length and lifespan of the needles of Siberian cedar pine trees of different origin

Происхождение	$M_{ср}$	±m	CV, %	$t_ф$ при t_{05} = 2,02	Уровень изменчивости
Длина хвои, см					
Алтайское	11,7	0,30	11,6	–	Низкий
Лениногорское	10,1	0,37	15,5	3,36	Средний
Ярцевское	10,7	0,50	14,8	1,71	
Продолжительность жизни хвои, лет					
Алтайское	3,7	0,29	35,9	2,20	Высокий
Лениногорское	3,4	0,26	31,8	2,98	
Ярцевское	4,7	0,35	23,6	–	

Средняя продолжительность жизни хвои сосны кедровой сибирской в зависимости от происхождения равна 3,9 года [7]. Наибольший показатель выявлен у деревьев ярцевского происхождения: на 27,0–38,2 % превышает значения для алтайской и лениногорской ($t_ф > t_{05}$) популяций при коэффициенте изменчивости 23,6–35,9 %.

Ранжирование потомств популяций по сравниваемым показателям в зависимости от географического происхождения показало, что наибольшей суммой рангов отличается потомство алтайской популяции. Меньшее количество баллов – у деревьев лениногорского происхождения (табл. 6).

Таблица 6

Ранговая оценка деревьев сосны кедровой сибирской разного происхождения, баллы
The ranking assessment of Siberian cedar pine trees of different origin, points

Происхождение	Высота	Диаметр ствола	Объем кроны	Количество ветвей	Длина хвои	Продолжительность жизни хвои	Общий ранг
Алтайское	3	3	3	2	3	2	16
Лениногорское	1	1	2	3	1	1	9
Ярцевское	2	2	1	1	2	3	11

Отмечено наличие деревьев, различающихся по типам развития (женское и мужское). Установлено, что среднее количество побегов с шишками на дереве в 55-летнем возрасте – 14,4 шт. Потомство алтайского происхождения сформировало наибольшее количество побегов с шишками и шишек на дереве (табл. 7). Меньшей урожайностью (в 1,7 раза) характеризуются деревья ярцевского варианта. Количество шишек на побеге (в пучке) составляет 1–3 шт., различаясь между вариантами несущественно. Семеносящих деревьев в алтайском варианте 75 %, лениногорском – 84 %, ярцевском – 89 %.

Таблица 7

Количество побегов с шишками у сосны кедровой сибирской разного происхождения, шт.
The number of shoots with cones in Siberian cedar pine trees of different origin, pcs.

Происхождение	$M_{ср}$	±m	CV, %	$t_ф$ при $t_{05} = 1,99$	Уровень изменчивости
Алтайское	17,4	1,56	81,6	–	Высокий
Лениногорское	14,6	1,45	64,2	1,31	
Ярцевское	11,3	0,96	58,8	3,33	

При определении количества побегов с микростробилами выявлено их наибольшее количество у деревьев ярцевского происхождения: в 1,1–1,6 раза больше, чем в лениногорском и алтайском вариантах. Формирование микростробилов на побеге в среднем варьирует от 10,3 до 11,5 шт. без существенных различий между вариантами (табл. 8).

Таблица 8

Образование микростробилов у сосны кедровой сибирской разного происхождения
The formation of microstrobilae in Siberian cedar pine trees of different origin

Происхождение	Микростробилы на побеге		Микростробилы на дереве	
	шт.	%*	шт.	% *
Алтайское	10,9	100	158,0	74,5
Лениногорское	11,5	105,5	240,4	113,3
Ярцевское	10,3	94,5	237,9	112,2
Среднее	10,9	100	212,1	100

*Здесь и в табл. 9 – по отношению к среднему.

Деревья отселектированы по 2 показателям – семенной и пыльцевой продуктивности (табл. 9). Для составления схем смешения выбраны следующие экземпляры: 2-57 алтайского происхождения, 1-9, 1-25, 1-59, 1-61 – лениногорского и 6-26 – ярцевского.

Таблица 9

Отселектированные по количеству шишек и микростробилов на дереве экземпляры сосны кедровой сибирской
The specimens of Siberian cedar pine selected by the number of cones and microstrobilae on the tree

Происхождение	Номер дерева	Количество шишек		Номер дерева	Количество микростробилов	
		шт.	%*		шт.	%*
Алтайское	2-48	115	330,4	2-28	877	554,7
	2-71	95	273,0	2-30	499	315,6
	2-74	94	270,1	2-74	340	215,1
	2-47	86	247,1	2-33	389	246,0
	2-57	85	244,2	2-57	442	279,6
	2-15	82	235,6	2-70	342	216,3
	2-72	76	218,4	2-24	360	227,7
	Среднее	34,8	100	*Среднее*	158,1	100
Лениногорское	1-9	76	238,5	1-31	1456	605,9
	1-25	57	192,6	1-25	1012	421,1
	1-23	54	182,4	1-26	448	186,4
	1-61	54	182,4	1-61	869	361,6
	1-50	52	175,7	1-9	916	381,2
	1-27	51	172,3	1-10	850	353,7
	1-59	48	162,2	1-59	1092	454,4
	Среднее	29,6	100	*Среднее*	240,3	100
Ярцевское	6-26	83	399,0	6-26	352	152,2
	6-75	47	226,0	6-106	539	226,6
	6-38	42	201,9	6-95	586	246,3
	6-31	36	173,1	6-103	481	202,2
	6-73	34	163,5	6-107	529	222,4
	6-70	32	153,8	6-27	290	121,9
	6-58	30	144,2	6-96	289	121,5
	Среднее	20,8	100	*Среднее*	237,9	100

Примечание: Среднее значение дано по всем деревьям с шишками и микростробилами.

Заключение

Установлено, что в географических культурах пригородной зоны Красноярска наибольшие высоту, диаметр ствола, диаметр и протяженность кроны, длину хвои имеют сосны кедровые сибирские алтайского происхождения

(зона оптимума для вида). Потомство ярцевского (северного) происхождения отличается наибольшими длиной боковых побегов, количеством мутовок с охвоенными побегами, продолжительностью жизни хвои. По количеству микростробилов деревья лениногорского и ярцевского происхождений превосходят алтайские варианты.

Отселектированные по 1 и 2 показателям деревья являются наилучшими для составления схем смешения при создании лесосеменных плантаций. При этом в список рекомендуемых деревьев включены не только быстрорастущие, урожайные деревья, но и экземпляры-опылители, что будет способствовать повышению урожайности на лесосеменных плантациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Бабич Н.А., Хамитов Р.С., Хамитова С.М.* Селекция и семенная репродукция кедра сибирского. Вологда–Молочное: ИЦ ВГМХА, 2014. 153 с.

Babich N.A., Khamitov R.S., Khamitova S.M. Breeding and Seed Reproduction of Siberian Cedar. Vologda–Molochnoye, Vologda State Dairy Farming Academy Publ., 2014. 153 p. (In Russ.).

2. *Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Щербаков А.Ю.* Популяционная структура географических культур ели европейской в оценках пигментного состава хвои // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2021. Вып. 237. С. 109–130.

Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Shcherbakov A.Yu. Population Structure of Geographical Cultures of European Spruce in the Estimates of the Pigment Composition of Needles. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2021, iss. 237, pp. 109–130. (In Russ.).

3. *Братилова Н.П., Калагин В.Н., Мантулина А.В., Калашников Р.В., Моксина Н.В., Мотырев Н.О.* Эндогенная изменчивость показателей роста и надземной фитомассы сосны кедровой корейской в искусственных насаждениях пригородной зоны Красноярска // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. XLI, № 6. С. 459–465.

Bratilova N.P., Kalagin V.N., Mantulina A.V., Kalashnikov R.V., Moksina N.V., Motyrev N.O. Endogenous Variability of Growth Indicators and Above Ground Phytomass of *Pinus koraiensis* on the Artificial Plantatings of the Suburban Zone of Krasnoyarsk. *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2023, vol. XLI, no. 6, pp. 459–465. (In Russ.). https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-6-459-465

4. *Брынцев В.А., Коженкова А.А*. Рост разных климатипов сосны кедровой сибирской при интродукции в Московскую область // Плодоводство, семеноводство, интродукция древес. растений. 2016. Т. XIX, № XIX(1). С. 11–14.

Bryntsev V.A., Kozhenkova A.A. The Growth of Different Climatypes of Siberian Cedar Pine during Introduction to the Moscow Region. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rastenij* = Gardening, Seed Growing, Introduction of Woody Plants, 2016, vol. XIX, no. XIX(1), pp. 11–14. (In Russ.).

5. *Велисевич С.Н., Хуторной О.В., Читоркина О.Ю.* Рост и репродукция разновысотных ценопопуляций сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в Северо-Восточном Алтае // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2009. № 3(7). С. 73–84.

Velisevich S.N., Khutornoy O.V., Chitorkina O.Yu. Growth and Reproduction of *Pinus sibirica* Du Tour Subpopulation Altitudinal Transect in the North-Eastern Altai. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2009, no. 3(7), pp. 73–84. (In Russ.).

6. *Выводцев Н.В., Кобаяси Р., Якимов Д.С.* Интродукция сосны кедровой сибирской в Хабаровске // Сохранение лесных генетических ресурсов Сибири: материалы 3-го Междунар. совещ. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2011. С. 32–33.

Vyvodtsev N.V., Kobayashi R., Yakimov D.S. Introduction of *Pinus sibirica* in Khabarovsk. *Sokhranenie lesnykh geneticheskikh resursov Sibiri* = Conservation of Forest Genetics Resources in Siberia: Proceedings of 3rd International Conference. Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS, 2011, pp. 32–33. (In Russ.).

7. *Гришлова М.В., Братилова Н.П.* Изменчивость показателей 55-летней сосны кедровой сибирской в разных условиях произрастания // Хвойные бореал. зоны. 2021. Т. XXXIX, № 2. С. 90–94. (In Russ.).

Grishlova M.V., Bratilova N.P. Variability of Indicators of 55-Year-Old *Pinus sibirica* in Different Growing Conditions. *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2021, vol. XXXIX, no. 2, pp. 90–94. (In Russ.).

8. *Земляной А.И.* О генофонде кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) // Сохранение лесных генетических ресурсов: материалы 5-й Междунар. конф.-совещ. Гомель: Колордрук, 2017. С. 54–57.

Zemlyanoy A.I. About the Gene Pool of Siberian Cedar (*Pinus sibirica* Du Tour). *Sokhranenie lesnykh geneticheskikh resursov* = Conservation of Forest Genetic Resources: Proceedings of the 5th International Conference. Homel, LLC "Kolordruk", 2017, pp. 54–57. (In Russ.).

9. *Ирошников А.И.* 1.1. Биоэкологические свойства и изменчивость кедра сибирского // Кедровые леса Сибири / отв. ред. А.С. Исаев. Новосибирск: Наука. Сиб. отдние, 1985. С. 8–40.

Iroshnikov A.I. 1.1. Bioecological Properties and Variability of Siberian Cedar. *Cedar Forests of Siberia*. Ed.-in-chief A.S. Isaev. Novosibirsk, Nauka Publ. (Siberian Branch), 1985, pp. 8–40. (In Russ.).

10. *Казанцева М.Н., Спасибова М.М.* Рост и продуктивность кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в посадках дендрария сибирской лесной опытной станции // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4, № 3. С. 94–107.

Kazantseva M.N., Spasibova M.M. Growth and Productivity of Siberian Cedar (*Pinus sibirica* Du Tour) in the Plantings of the Arboretum, Siberian Forest Experiment Station. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie* = Tyumen State University Herald. Natural Resource and Ecology, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 94–107. (In Russ.). https://doi.org/10.21684/2411-7927-2018-4-3-94-107

11. *Кузнецова Г.В.* Межпопуляционная изменчивость размера шишек и массы семян сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. XL, № 5. С. 369–373.

Kuznetsova G.V. Interpopulation Variability of the Size of Cones and Seed Weight of Siberian Pine (*Pinus sibirica* Du Tour). *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2022, vol. XL, no. 5, pp. 369–373. (In Russ.). https://doi.org/1053374/1993-0135-2022-5-369-373

12. *Матвеева Р.Н., Милютин Л.И., Буторова О.Ф., Братилова Н.П.* Отбор деревьев кедра сибирского высокой репродуктивной способности на географической лесосеменной плантации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 9–20.

Matveeva R.N., Milyutin L.I., Butorova O.F., Bratilova N.P. Selection of High Reproductive Siberian Cedar Trees in the Geographic Seed Plantation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 2, pp. 9–20. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.9

13. *Мерзленко М.Д., Глазунов Ю.Б., Мельник П.Г.* Результаты выращивания провениенций сосны обыкновенной в географических посадках Серебряноборского опытного лесничества // Лесоведение. 2017. № 3. С. 176–182.

Merzlenko M.D., Glazunov Y.B., Mel'nik P.G. Growing Geographical Trial Provenances of the Scots Pine in Serebryany Bor Forestry. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2017, no. 3, pp. 176–182. (In Russ.).

14. *Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Демина Н.А.* Изучение реакции потомства ели разного географического происхождения в системе «генотип-среда» на Европейском Севере России // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2017. Вып. 221. С. 145–161.

Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Demina N.A. The Study of the Reaction of Spruce Progeny of Different Geographical Origins in the Genotype-Environment System in the European North of Russia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2017, iss. 221, pp. 145–161. (In Russ.).

15. *Николаева М.А., Варенцова Е.Ю., Межина К.М.* Оценка сохранности и состояния *Pinus sibirica* Du Tour в географических культурах Ленинградской области // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. XL, № 5. С. 381–387.

Nikolaeva M.A., Varentsova E.Yu., Mezhina K.M. Assessment of the Preservation and Condition of *Pinus sibirica* Du Tour in Provenance Trials of the Leningrad Region. *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2022, vol. XL, no. 5, pp. 381–387. (In Russ.). https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-5-381-387

16. *Тараканов В.В., Дубовик Д.С., Роговцев Р.В., Зацепина К.Г., Бугаков А.В., Гончарова Т.В.* Состояние и перспективы развития генетико-селекционного комплекса хвойных пород в Сибири (на примере Новосибирской области) // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 3(43). С. 5–24.

Tarakanov V.V., Dubovik D.S., Rogovtsev R.V., Zatsepina K.G., Bugakov A.V., Goncharova T.V. State and Perspectives for Development of the Genetic-Breeding Pool of Conifers in Siberia (Based on the Example of the Novosibirsk Region). *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2019, no. 3(43), pp. 5–24. (In Russ.).

17. *Титов Е.В.* Орехоплодовые плантации кедровых сосен // Лесн. хоз-во. 2001. № 1. С. 36–38.

Titov E.V. Cedar Pine Nut Plantations. *Lesnoe khozyajstvo*, 2001, no. 1, pp. 36–38. (In Russ.).

18. Brockerhoff E.G., Jactel H., Parrotta J.A., Quine C.P., Sayer J. Plantation Forests and Biodiversity: an Oxymoron or Opportunity? Biodiversity and Conservation, 2008, vol. 17, pp. 925–951. https://doi.org/10.1007/s10531-008-9380-x

19. Chmura D.J., Giertych M., Rozkowski R. Early Height Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Progenies from Polish Clonal Seed Orchards. *Dendrobiology*, 2003, vol. 49, pp. 15–23.

20. Dobrev R. Family Selection of Height and Diameter Growth of 16 Years Old Progenies of Macedonian Pine (*Pinus peuce* Griseb.). *Nauka za Gorata*, 2007, vol. 44, no. 4, pp. 17–30.

21. Giertych M. Summary of Results of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Height Growth in IUFRO Provenance Experiments. *Silvae Genetica*, 1979, vol. 28, iss. 4, pp. 136–152.

22. Zhuk E., Goroshkevich S. Growth and Reproduction in *Pinus sibirica* Ecotypes from Western Siberia in a Common Garden Experiment. *New Forests*, 2018, vol. 49, no 2, pp. 159–172. https://doi.org/10.1007/s11056-017-9611-7

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 630*181
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-20-34

Состояние арборифлоры парка «Гвардейский» г. Красноярска

М.А. Кириенко*[1], *канд. биол. наук, науч. сотр.; *ResearcherID: AID-3849-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3824-1144*
Л.Н. Скрипальщикова*[1], *канд. биол. наук, доц., ст. науч. сотр.;
ResearcherID: AAF-7714-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2294-497X
И.А. Гончарова*[1,2]✉, *канд. биол. наук, науч. сотр.; *ResearcherID: AAF-6890-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3495-9979*
[1]Институт леса им. В.Н. Сукачёва Красноярского научного центра СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; lma7878@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, iagoncharova007@mail.ru✉
[2]Красноярский краевой краеведческий музей, ул. Дубровинского, д. 84, г. Красноярск, Россия, 660049; iagoncharova007@mail.ru✉

Поступила в редакцию 25.01.23 / Одобрена после рецензирования 20.04.23 / Принята к печати 23.04.23

Аннотация. Проведена инвентаризация зеленых насаждений парка «Гвардейский» Советского района г. Красноярска. Цель работы – оценка видового состава и жизненного состояния древесной и кустарниковой растительности на территории этого парка. Исследование выполнено в летний период 2020 г. Видовое разнообразие, жизненное и санитарное состояние древесно-кустарниковой растительности оценено методом сплошного перечета. Индекс жизненного состояния зеленых насаждений определен с использованием общепринятой методики визуальной оценки древесной и кустарниковой растительности. Установлено, что в парке обитает 38 видов растений (по 19 деревьев и кустарников), относящихся к 30 родам 17 семейств. Растения расположены в виде аллейных и групповых посадок, солитеров, боскетов, а также включены в живые изгороди. Индексы состояния насаждений парка составляют 1,93 для растений в составе аллейных и групповых посадок, солитеров, боскетов, что соответствует ослабленному или слабо поврежденному состоянию; и 1,28 для растений живых изгородей – здоровое насаждение. По итогам исследования определены структура насаждений парка, ее особенности, виды, вносящие в нее основной вклад в количественном отношении. Выявлены наиболее ослабленные виды и причина их ослабления. Из древесных растений в парке ослаблены тополь бальзамический и вяз приземистый, что обусловлено возрастом насаждений. Ослабленное состояние лиственницы сибирской вызвано массовым поражением лиственничной почковой галлицей. Сделан вывод об отсутствии своевременного ухода за растениями, что повлекло ухудшение жизненного состояния многих видов. Определены виды, наиболее устойчивые к неблагоприятным факторам, связанным с произрастанием в условиях города. На основе анализа полученных результатов сформулированы рекомендации по улучшению состояния насаждений парка «Гвардейский».

Ключевые слова: видовой состав, экологическое состояние насаждений, парк, древесно-кустарниковая растительность, озеленение городов, Красноярск

© Кириенко М.А., Скрипальщикова Л.Н., Гончарова И.А., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Благодарности: Работа выполнена в рамках базового проекта фундаментальных исследований Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН № FWES-2024-0028 «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты».

Для цитирования: Кириенко М.А., Скрипальщикова Л.Н., Гончарова И.А. Состояние арборифлоры парка «Гвардейский» г. Красноярска // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 20–34. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-20-34

Original article

The Condition of Arboriflora of the Gvardejskij Park of Krasnoyarsk

Maria A. Kirienko[1], *Candidate of Biology, Research Scientist;*
ResearcherID: AID-3849-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3824-1144
Larisa N. Skripal'shchikova[1], *Candidate of Biology, Assoc. Prof., Senior Research Scientist; ResearcherID: AAF-7714-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2294-497X*
Irina A. Goncharova[1,2]✉, *Candidate of Biology, Research Scientist;*
ResearcherID: AAF-6890-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3495-9979
[1]Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS", Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; lma7878@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, iagoncharova007@mail.ru✉
[2]Krasnoyarsk Regional Museum of Local Lore, ul. Dubrovinskogo, 84, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; iagoncharova007@mail.ru✉

Received on January 25, 2023 / Approved after reviewing on April 20, 2023 / Accepted on April 23, 2023

Abstract. An inventory of green spaces in the Gvardejskij Park of the Sovetskij District of Krasnoyarsk has been carried out. The aim of the work has been to assess the species composition and vital condition of woody and shrubby vegetation in the territory of this park. The study was carried out in the summer of 2020. The species diversity, vital and sanitary condition of the woody and shrubby vegetation has been assessed by the complete enumeration method. The vitality index of green spaces has been determined using the generally accepted method of visual assessment of woody and shrubby vegetation. It has been established that the park is home to 38 plant species (19 trees and shrubs each) belonging to 30 genera of 17 families. The plants are arranged in the form of alley and group plantings, solitaires, bosquets, and are also included in hedges. The vitality index of the park's plantings is 1.93 for plants in the composition of alley and group plantings, solitaires and bosquets, which corresponds to a weakened or slightly damaged condition, and 1.28 for hedge plants – a healthy planting. Based on the results of the study, the structure of the park's plantings, its features, and the species that make the main quantitative contribution to it have been determined. The most weakened species and the reason for their weakening have been identified. Of the woody plants in the park, balsam poplar and Siberian elm are weakened, which is due to the age of the

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

plantings. The weakened condition of Siberian larch is caused by massive infestation by larch bud gall midge. The conclusion has been made about the lack of timely care for plants, which has led to deterioration in the vital condition of many species. Species that are most resistant to adverse factors associated with growing in urban conditions have been identified. Based on the analysis of the results obtained, recommendations have been formulated to improve the condition of the plantings of the Gvardejskij Park.
Keywords: species composition, ecological condition of plantings, park, woody and shrubby vegetation, landscaping of cities, Krasnoyarsk
Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the basic project of fundamental research of Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS no. FWES-2024-0028 “Biodiversity of Siberian Forests: Ecological-Dynamic, Genetic-Breeding, Physical-Chemical and Resource-Technological Aspects”.

For citation: Kirienko M.A., Skripal’shchikova L.N., Goncharova I.A. The Condition of Arboriflora of the Gvardejskij Park of Krasnoyarsk. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 20–34. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-20-34

Введение

Озелененные территории крупных промышленных городов – бульвары, скверы, парки, сады, лесопарки, а также зеленые насаждения жилой и промышленной застроек – находятся в сложных экологических условиях, постоянно испытывают воздействие высоких концентраций выхлопных газов от автотранспорта и вредных выбросов от промышленности, повышенные рекреационные нагрузки, различные температурные инверсии.

Растительный покров парковых зон урбанизированных территорий составляет основу зеленого каркаса, важнейшей задачей которого является оптимизация экологических условий и создание благоприятной среды для проживания населения [14].

Растительность на озелененных территориях города как живой компонент природы постоянно трансформируется в пространстве и во времени. В процессе роста и развития древесные растения постепенно стареют, теряют свои полезные качества, гибнут [1].

Оценка видового разнообразия, жизненных форм и жизненного состояния зеленых насаждений позволила бы сформировать пространственно-ценотическую структуру городских парков, которая бы эффективно выполняла средообразующие, биоэкологические и эстетические функции.

Вопросы влияния устойчивых и высокодекоративных зеленых насаждений на формирование городского облика, условий жизни и архитектурно-ландшафтной ценности исторических центров как малых, так и крупных населенных пунктов поднимались неоднократно [2, 4–6, 12, 13, 15, 19, 20, 22–32], однако работы, посвященные экологическому состоянию зеленых насаждений в г. Красноярске, малочисленны [7, 16, 17].

Цель – оценить видовой состав, санитарное и жизненное состояние древесной и кустарниковой растительности в парке «Гвардейский» Советского района г. Красноярска. Актуальность исследования обусловлена необходимостью поддержания в Красноярске оптимальных экологических условий город-

ской среды и эстетической привлекательности самих насаждений, которые в значительной степени зависят от видового состава растительных сообществ и их жизненного состояния.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужили зеленые насаждения на территории парка «Гвардейский», расположенного в Советском районе г. Красноярска – согласно государственному докладу «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2019 году», одном из самых сложных в экологическом плане районов города. Парк основан в 1966 г., его площадь составляет 231 505 м^2.

Санитарное состояние древостоев оценивалось с использованием общепринятой методики [3]. Выполнен сплошной лесопатологический перечет с распределением деревьев по категориям состояния: 1-я – без признаков ослабления; 2-я – ослабленные или слабо поврежденные; 3-я – средне поврежденные; 4-я – сильно поврежденные или отмирающие; 5-я – сухостой. При перечете фиксировали пораженность деревьев болезнями и иными факторами. Инфекционные болезни диагностировали по комплексу макропризнаков: специфические анатомо-морфологические нарушения у деревьев, репродуктивные образования возбудителей, – используя справочную литературу и определители [9, 18].

Установление индекса жизненного состояния зеленых насаждений проведено по общепринятой методике [3, 21]:

$$I = (n_1 1 + n_2 2 + n_3 3 + n_4 4 + n_5 5\ldots)/n_{общ},$$

где n_1–n_5 – число растений, шт.; $n_{общ}$ – общее число растений, шт.; 1–5 – категория жизненного состояния.

Состояние насаждения определено по следующей шкале: индекс жизненного состояния равен 1,0–1,5 – здоровое; 1,6–2,5 – ослабленное (слабо поврежденное); 2,6–3,5 – сильно ослабленное (сильно поврежденное); 3,6–4,5 – усыхающее; 4,6 и более – погибшее.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам сплошного перечета было установлено, что древесно-кустарниковая растительность парка представлена 38 видами растений (19 деревьев и 19 кустарников), относящимися к 30 родам 17 семейств и произрастающими в виде аллейных и групповых посадок, солитеров, боскетов, а также входящими в состав живых изгородей общей протяженностью 835 м.

Результаты оценки состояния насаждений парка «Гвардейский» представлены в табл. 1 и 2. Средние индексы жизненного состояния равняются 1,93 для растений в составе аллейных и групповых посадок, солитеров, боскетов, что соответствует ослабленному или слабо поврежденному состоянию насаждения; и 1,28 для растений в составе живых изгородей – это здоровое насаждение. Следует отметить, что виды, произрастающие в составе живых изгородей и куртин, имеют только 1-ю и 2-ю категории жизненного состояния.

Таблица 1

Состояние насаждений парка «Гвардейский» в составе аллейных и групповых посадок, солитеров, боскетов
The condition of plants of the Gvardejskij Park in the composition of alley and group plantings, solitaires and bosquets

Вид	Жизненная форма*	Категория жизненного состояния										Всего, шт.	Индекс
		1		2		3		4		5			
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%		
Береза повислая (*Betula pendula* Roth)	Д	192	79,3	43	17,8	6	2,5	1	0,4	–	–	242	1,24
Боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* Pall.)	Д	1	50,0	1	50,0	–	–	–	–	–	–	2	1,50
Вяз мелколистный (*Ulmus pumila* L.)	Д	57	16,7	140	41,1	119	34,9	16	4,7	9	2,6	341	2,35
Вяз шершавый (*U. glabra* Huds.)	Д	9	90,0	1	10,0	–	–	–	–	–	–	10	1,10
Груша уссурийская (*Pyrus ussuriensis* Maxim.)	Д	124	94,7	7	5,3	–	–	–	–	–	–	131	1,05
Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.)	Д	63	71,6	19	21,6	–	–	1	1,1	5	5,7	88	1,48
Клен ясенелистный (*Acer negundo* L.)	Д	70	39,3	64	36,0	41	23,0	3	1,7	–	–	178	1,87
Липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.)	Д	29	76,3	8	21,1	1	2,6	–	–	–	–	38	1,26

Продолжение табл. 1

Вид	Жизненная форма*	Категория жизненного состояния										Всего, шт.	Индекс
		1		2		3		4		5			
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%		
Лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.)	Д	91	19,1	209	43,8	165	34,6	11	2,3	1	0,2	477	2,21
Рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.)	Д	13	81,3	1	6,3	2	12,5	–	–	–	–	16	1,31
Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.)	Д	34	50,0	32	47,1	2	2,9	–	–	–	–	68	1,53
Сосна сибирская (*P. sibirica* Du Tour)	Д	5	62,5	3	37,5	–	–	–	–	–	–	8	1,38
Тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.)	Д	88	11,7	337	44,8	283	37,6	42	5,6	3	0,4	753	2,38
Тополь белый (*P. alba* L.)	Д	–	–	1	100	–	–	–	–	–	–	1	2,00
Черемуха виргинская (*Padus virginiana* (L.) Mill.)	Д	–	–	–	–	3	100	–	–	–	–	3	3,00
Черемуха Маака (*Padus maackii* (Rupr.) Kom.)	Д	23	48,9	15	31,9	6	12,8	3	6,4	–	–	47	1,77
Черемуха обыкновенная (*P. avium* Mill.)	Д	25	61,0	13	31,7	2	4,9	1	2,4	–	–	41	1,49

Продолжение табл. 1

Вид	Жизненная форма*	Категория жизненного состояния										Всего, шт.	Индекс
		1		2		3		4		5			
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%		
Яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) Borkh.)	Д	140	46,7	107	35,7	28	9,3	5	1,7	20	6,7	300	1,86
Ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.)	Д	42	64,6	12	18,5	8	12,3	2	3,1	1	1,5	65	1,58
Барбарис обыкновенный (*Berberis vulgaris* L.)	К	–	–	1	100	–	–	–	–	–	–	1	2,00
Бересклет священный (*Euonymus sacrosanctus* Koidz.)	К	5	83,3	1	16,7	–	–	–	–	–	–	6	1,17
Бузина обыкновенная (*Sambucus racemosa* L.)	К	4	57,1	3	42,9	–	–	–	–	–	–	7	1,43
Вишня войлочная (*Cerasus tomentosa* (Thunb.) Loisel.)	К	–	–	4	100	–	–	–	–	–	–	4	2,00
Жестер слабительный (*Rhamnus cathartica* L.)	К	2	50,0	2	50,0	–	–	–	–	–	–	4	1,50
Жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteum* L.)	К	2	11,8	8	47,1	7	41,2	–	–	–	–	17	2,29
Ива Ледебура (*Salix ledebouriana* Trautv.)	К	1	100	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1,00

Окончание табл. 1

Вид	Жизненная форма*	Категория жизненного состояния										Всего, шт.	Индекс
		1		2		3		4		5			
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%		
Ива остролистная (*Salix acutifolia* Willd.)	Д, К	–	–	1	25,0	3	75,0	–	–	–	–	4	2,75
Калина обыкновенная (*Viburnum opulus* L.)	К	1	100	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1,00
Карагана древовидная (*Caragana arborescens* Lam.)	К	6	100	–	–	–	–	–	–	–	–	6	1,00
Лох серебристый (*Elaeagnus commutata* Bernh. ex Rydb.)	К	3	60,0	2	40,0	–	–	–	–	–	–	5	1,40
Сирень венгерская (*Syringa josikaea* J. Jacq. ex Reichenb.)	К	163	64,4	72	28,5	16	6,3	2	0,8	–	–	253	1,43
Смородина золотистая (*Ribes aureum* Pursh.)	К	3	50,0	3	50,0	–	–	–	–	–	–	6	1,50
Спирея городчатая (*Spiraea crenata* L.)	К	15	88,2	2	11,8	–	–	–	–	–	–	17	1,12
*Итого***		1211	38,6	1112	35,4	692	22,0	87	2,8	39	1,2	3141	1,93

*Здесь и в табл. 2: Д – дерево, К – кустарник. **Здесь и далее для индекса жизненного состояния – среднее.

Таблица 2

Состояние насаждений парка «Гвардейский» в составе живых изгородей и куртин
The condition of plants of the Gvardejskij Park
in the composition of hedges and clumps

Вид	Жизненная форма	Категория жизненного состояния		Индекс
		1	2	
Живые изгороди, м				
Смородина золотистая (*Ribes aureum*)	К	55	111	1,67
Вяз мелколистный (*Ulmus pumila*)	Д	432	–	1,00
Вяз шершавый (*U. glabra*)	Д	8	–	1,00
Жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteum*)	К	140	–	2,00
Вишня войлочная (*Cerasus tomentosa*)	К	6	–	1,00
Роза колючейшая (*Rosa spinosissima* L.)	К	–	17	2,00
Роза иглистая (*R. acicularis* Lindl.)	К	5	–	1,00
Кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schltdl.)	К	10	–	1,00
Сирень венгерская (*Syringa josikaea*)	К	–	51	2,00
Куртины, м²				
Рябинник рябинолистный (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun)	К	16	–	1,00
Роза морщинистая (*R. rugosa* Thunb.)	К	10	–	1,00
Итого		682	179	1,28

В структуре насаждений парка наибольшим количеством среди деревьев отличаются тополь бальзамический (27 %), лиственница сибирская (17 %), вяз мелколистный (12 %), яблоня ягодная (11 %), береза повислая (9 %). Доля остальных деревьев составляет менее 9 % (рис. 1).

Рис. 1. Структура древесной растительности парка «Гвардейский»

Fig. 1. The structure of the woody vegetation of the Gvardejskij Park

Анализируя жизненное состояние деревьев, произрастающих в парке, стоит особо отметить лиственницу сибирскую. Деревья данного древесного вида на 80 % поражены лиственничной почковой галлицей (*Dasineura rozhkovi* Mam. et Nik.) – комаровидным насекомым семейства галлиц. Заболевание характеризуется тем, что личинка вредителя проникает в точку роста листовой почки и вызывает ее ненормальное развитие, вследствие чего из почек вместо здоровых побегов с хвоей вырастают патологические новообразования – галлы. Такие нарушения приводят к тому, что хвоя становится недоразвитой, преждевременно желтеет и опадает, годичные приросты крайне незначительные либо отсутствуют, ствол деформируется, ветви усыхают. Все это может привести к гибели деревьев.

Среди деревьев тополя бальзамического и вяза мелколистного преобладают экземпляры 2-й и 3-й категорий жизненного состояния, что в большей степени обусловлено возрастом насаждений. Значительная часть посадок этих деревьев была проведена в 60–70-е гг. прошлого века. У деревьев указанных видов отмечены гнили, сокотечение, раковые заболевания, наличие плодовых тел дереворазрушающих грибов, грибковые поражения листьев. Молодые экземпляры данных древесных видов, появившиеся путем самосева, отличаются здоровым жизненным состоянием.

Деревья яблони ягодной, произрастающие в виде живой изгороди, преимущественно находятся в средне и сильно поврежденном состоянии в отличие от аллейных и групповых посадок данного вида, практически не имеющих признаков повреждений. Причиной ослабленного состояния является неправильная и несвоевременная формовочная обрезка, а также высокая конкуренция с травянистой растительностью.

Наиболее устойчивыми среди деревьев видами, произрастающими в парке, являются береза повислая и груша уссурийская: 80 и 95 % соответственно приходятся на долю деревьев без признаков ослабления. Под устойчивостью понимается способность растений противостоять воздействию экстремальных факторов среды (почвенная и воздушная засуха, засоление почв, низкие температуры, воздействие загрязняющих веществ, энтомовредители и фитопатогены). Высокую устойчивость данных видов отмечают и другие исследователи [10, 11]. Ослабленные деревья указанных видов – молодые посадки последних лет. Причина их ослабления – отсутствие либо недостаток своевременных агротехнических уходов: поливов, окашиваний, рыхлений приствольных кругов.

В структуре насаждений парка среди растений с жизненной формой «кустарник» наибольший удельный вес имеет сирень венгерская (76 %). На долю остальных видов кустарников приходится 24 % (рис. 2).

Среди кустарников наиболее ослабленной является жимолость обыкновенная. Ослабление вызвано поражением растений микроскопическими эктопаразитическими грибами порядка эризифовых (Erysiphales), вызывающими заболевание мучнистой росой; повреждением листьев энтомовредителями, а также недостаточностью агротехнического ухода. Кроме того, стоит отметить низкие показатели жизненного состояния у ивы остролистной, обусловленные предельным возрастом растений данного вида. Остальные виды кустарников имеют слабо поврежденное состояние.

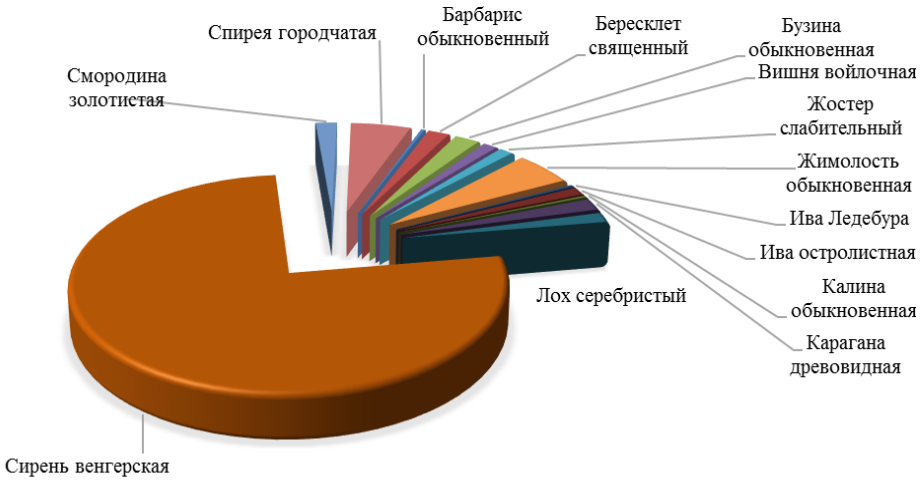


Рис. 2. Структура кустарниковой растительности в парке «Гвардейский»

Fig. 2. The structure of the shrubby vegetation of the Gvardejskij Park

За последние годы в парке «Гвардейский» были выполнены посадки таких видов деревьев, как ясень обыкновенный, липа мелколистная, береза повислая, яблоня ягодная, черемуха Маака, рябина обыкновенная, груша уссурийская, черемуха виргинская, сосна обыкновенная, сосна сибирская, ель сибирская, лиственница сибирская, а также кустарников: смородины золотистой, спиреи городчатой, бересклета священного, сирени венгерской, жостера слабительного, жимолости обыкновенной, лоха серебристого, барбариса обыкновенного, калины обыкновенной.

В ходе оценки данных молодых посадок было отмечено их сильное зарастание травянистой растительностью, что свидетельствует об отсутствии своевременного ухода и послужило основной причиной снижения их жизненного состояния.

К сожалению, бóльшая часть упомянутых видов имеет крайне незначительную долю (менее 1 %) в структуре дендрофлоры парка, а некоторые произрастают в единственном экземпляре. Многие виды, такие как бересклет священный, лох серебристый, кизильник блестящий, роза морщинистая, роза иглистая и др., отличаются высокой декоративностью и устойчивостью, и их следовало бы шире внедрять в состав насаждений парка [8].

Заключение

Древесно-кустарниковая растительность парка «Гвардейский» представлена 38 видами растений (19 деревьев и 19 кустарников) 30 родов 17 семейств. Растения входят в состав аллейных и групповых посадок, солитеров, боскетов, а также живых изгородей.

Наибольшим удельным весом среди деревьев в структуре дендрофлоры парка характеризуются тополь бальзамический, лиственница сибирская, вяз мелколистный, яблоня ягодная, береза повислая. Доля остальных деревьев составляет менее 9 %. Среди кустарников наибольший удельный вес имеет сирень венгерская.

Индексы состояния насаждений парка равняются 1,93 для растений в составе аллейных и групповых посадок, солитеров, боскетов, что отражает ослабленное или слабо поврежденное состояние насаждения; и 1,28 для растений в составе живых изгородей – условно здоровое насаждение.

Среди деревьев наиболее ослабленными видами являются тополь бальзамический и вяз приземистый, что обусловлено возрастом насаждений, а также лиственница сибирская, чье ослабленное состояние вызвано массовым поражением лиственничной почковой галлицей. Наиболее устойчивые виды – береза повислая и груша уссурийская.

Среди кустарников наиболее ослабленной является жимолость обыкновенная. Ослабление вызвано поражением растений микроскопическими эктопаразитическими грибами порядка эризифовых (Erysiphales), провоцирующими заболевание мучнистой росой, а также повреждением листьев энтомовредителями и недостаточностью агротехнического ухода. Низкие показатели жизненного состояния имеет и ива остролистная, что обусловлено предельным возрастом экземпляров данного вида. Остальные виды кустарников характеризуются слабо поврежденным состоянием.

Для улучшения состояния древесно-кустарниковой растительности парка следует рекомендовать:

регулярное выполнение инвентаризации зеленых насаждений с целью выявления экземпляров растений с категорией жизненного состояния 3 и выше с их последующей заменой;

расширение ассортимента дендрофлоры парка видами, устойчивыми к промышленному загрязнению и при этом обладающими высокими декоративными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Аксянова Т.Ю., Ступакова О.М.* Агротехника содержания насаждений в урбанизированном ландшафте. Красноярск, 2019. 82 с.

Aksyanova T.Yu., Stupakova O.M. *Agricultural Technology for Maintaining Plantings in an Urbanized Landscape*. Krasnoyarsk, 2019. 82 p. (In Russ.).

2. *Александрова М.С., Лапин П.И., Петрова И.П., Плотникова Л.С., Щербацевич В.Д., Якушина Э.И.* Древесные растения парков Подмосковья. М.: Наука, 1979. 236 с.

Aleksandrova M.S., Lapin P.I., Petrova I.P., Plotnikova L.S., Shcherbatsevich V.D., Yakushina E.I. *Woody Plants of Moscow Region Parks*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 236 p. (In Russ.).

3. *Алексеев В.А.* Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

Alekseev V.A. Diagnostics of the Vital Condition of Trees and Stands. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1989, no. 4, pp. 51–57. (In Russ.).

4. *Аткина Л.И., Вишнякова С.В., Жукова М.В., Луганская С.Н., Суслова Н.Г.* Современное состояние зеленых насаждений парка-стадиона Химмаш в г. Екатеринбурге // Перм. аграр. вестн. 2017. № 2(18). С. 6–12.

Atkina L.I., Vishnyakova S.V., Zhukova M.V., Luganskaya S.N., Suslova N.G. Current Condition of Green Plantings in the Park-Stadium Khimmash in Yekaterinburg. *Permskij agrarnyj vestnik* = Perm Agrarian Journal, 2017, no. 2(18), pp. 6–12. (In Russ.).

5. *Грачева Е.Н.* Анализ древесно-кустарниковой растительности сохранившихся усадеб Подмосковья // Актуал. исследования. 2020. № 8(11). С. 47–52.

Gracheva E.N. Analysis of Wood-Shrub Vegetation of Preserved Estates of Moscow Region. *Aktual'nyye issledovaniya*, 2020, no. 8(11), pp. 47–52. (In Russ.).

6. *Жудрик Е.В., Деревинская А.А.* Видовая структура древесных насаждений сквера И. Пулихова г. Минска // Веснік Віцебскага дзяржаўнага універсітэта. 2016. № 1(90). С. 79–85.

Zhudrik E.V., Derevinskaya A.A. Species Structure of Tree Plantings in I. Pulikhov Minsk City Park. *Vesnik Vitsebskaga dzyarzhaŭnaga universiteta*, 2016, no. 1(90), pp. 79–85. (In Russ.).

7. *Зубарева О.Н., Прысов Д.А., Буланова О.С.* Анализ состояния зеленых насаждений Центрального парка города Красноярска // Сиб. лесн. журн. 2021. № 6. С. 46–58.

Zubareva O.N., Prysov D.A., Bulanova O.S. Analyzing the Health of Trees and Shrubs of Krasnoyarsk Central Park. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2021, no. 6, pp. 46–58. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/SJFS20210605

8. *Коропачинский И.Ю., Лоскутов Р.И.* Древесные растения для озеленения Красноярска. Новосибирск: Гео, 2014. 320 с.

Koropachinskij I.Yu., Loskutov R.I. *Woody Plants for Landscaping in Krasnoyarsk*. Novosibirsk, Geo Publ., 2014. 320 p. (In Russ.).

9. *Кузьмичев Е.П., Соколова Э.С., Мозолевская Е.Г.* Болезни древесных растений: справ. Т. I. Болезни и вредители в лесах России. М.: ВНИИЛМ, 2004. 120 с.

Kuz'michev E.P., Sokolova E.S., Mozolevskaya E.G. *Diseases of Woody Plants. Vol. 1. Diseases and Pests in the Forests of Russia*. Moscow, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization Publ., 2004. 120 p. (In Russ.).

10. *Кулагин Ю.З.* Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука, 1974. 125 с.

Kulagin Yu.Z. *Woody Plants and Industrial Environment*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 125 p. (In Russ.).

11. *Николаевский В.С.* Биологические основы газоустойчивости растений. М.: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 278 с.

Nikolaevskij V.S. *Biological Bases of Plant Gas Resistance*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 278 p. (In Russ.).

12. *Полякова Г.А.* Флора и растительность старых парков Подмосковья. М.: Наука, 1992. 225 с.

Polyakova G.A. *Flora and Vegetation of the Old Parks in the Moscow Region*. Moscow, Nauka Publ., 1992. 225 p. (In Russ.).

13. *Полякова Г.А., Гутников В.А.* Парки Москвы: экология и флористическая характеристика. М.: ГЕОС, 2000. 406 с.

Polyakova G.A., Gutnikov V.A. *Moscow Parks: Ecology and Floral Characteristics.* Moscow, GEOS Publ., 2000. 406 p. (In Russ.).

14. *Семенюк О.В.* Устойчивое развитие и исторические парковые территории // Экологические проблемы исторических парков: материалы V науч.-практ. конф. СПб., 2014. С. 8–15.

Semenyuk O.V. Sustainable Development and Historic Parklands. *Environmental Problems of Historical Parks:* Materials of the V Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, 2014, pp. 8–15. (In Russ.).

15. *Сокольская О.Б., Кузин А.Н.* Анализ состояния парка князей Волконских в селе Владыкино Саратовской области и рекомендации по его использованию // Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та. 2011. № 2(76). С. 51–57.

Sokol'skaya O.B., Kuzin A.N. Analysis of the Condition of the Volkonsky Princes' Park in the Village of Vladykino, Saratov Region and Recommendations for its Use. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University, 2011, no. 2(76), pp. 51–57. (In Russ.).

16. *Татаринцев А.И.* Санитарное состояние насаждений лиственницы в г. Красноярске // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. XXVII, № 3–4. С. 289–293.

Tatarintsev A.I. The Sanitary State of Larch Plantations in Krasnoyarsk City. *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. XXVII, no. 3–4, pp. 289–293. (In Russ.).

17. *Татаринцев А.И.* Санитарное состояние насаждений вяза в г. Красноярске // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 8(71). С. 68–72.

Tatarintsev A.I. Elm Tree Stand Sanitation Condition in Krasnoyarsk City. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2012, no. 8(71), pp. 68–72. (In Russ.).

18. *Черемисинов Н.А., Негруцкий С.Ф., Лешковцева И.И.* Грибы и грибные болезни деревьев и кустарников: справ. пособие для определения грибов по растениям-хозяевам. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 392 с.

Cheremisinov N.A., Negrutskij S.F., Leshkovtseva I.I. *Fungi and Fungal Diseases of Trees and Shrubs*: a Reference Guide for Identifying Fungi by Host Plants. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970. 392 p. (In Russ.).

19. *Швецова М.С., Каманина И.З., Зиньковская И.И., Мададзада А.И., Нехорошков П.С.* Изучение элементного состава древесных и кустарниковых растений на территории рекреационных зон Москвы // Экология урбанизир. территорий. 2021. № 3. С. 39–50.

Shvetsova M.S., Kamanina I.Z., Zinicovscaia I.I., Madadzada A.I., Nekhoroshkov P.S. The Study of the Elemental Composition of Woody and Bushy Plants in the Territory of Recreational Zones of Moscow. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* = Ecology of Urban Areas, 2021, no. 3, pp. 39–50. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/1816-1863-2021-3-39-50

20. *Шихова Н.С.* Анализ функциональной эффективности зеленых насаждений в структуре городского озеленения Владивостока // Вестн. ДВО РАН. 2020. № 3(211). С. 103–115.

Shikhova N.S. The Analysis of Functional Significance of the Urban Plantings in Vladivostok Landscape Structure. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk* = Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 2020, no. 3(211), pp. 103–115. (In Russ.). https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.011

21. *Шяпятене Я.А.* О выборе показателей для мониторинга лесных экосистем // Биомониторинг лесных экосистем: материалы междунар. шк.-семинара. Каунас: ЛитСХА, 1987. С. 108–111.

Shyapyatene Ya.A. On the Choice of Indicators for Monitoring Forest Ecosystems. *Biomonitoring of Forest Ecosystems*: Materials of the International School-Seminar. Kaunas, Lithuanian Agricultural Academy Publ., 1987, pp. 108–111. (In Russ.).

22. Chiesura A. The Role of Urban Parks for the Sustainable City. *Landscape and Urban Planning*, 2004, no. 68, pp. 129–138. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.08.003

23. Gao H., Dong L., Li F. Modeling Variation in Crown Profile with Tree Status and Cardinal Directions for Planted *Larix olgensis* Henry Trees in Northeast China. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 5, art. no. 139. https://doi.org/10.3390/f8050139

24. Hajifathali M., Khodadadi B. "Vertical Parks", Proceeding Towards Sustainable Development. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 2016, vol. 7, sp. iss. 5, pp. 1265–1272.

25. Ignatieva M., Konechnaya G. Floristic Investigations of Historical Parks in St. Petersburg, Russia. *Urban Habitats*, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 174–216.

26. Kazakova M. The Conservation and Reconstruction of the Ryazan Region Historical Parks. *History of the Future*: Proceedings of the 52th World Congress of the International Federation of Landscape Architects. St. Petersburg, 2015, pp. 156–157.

27. Konijnendijk C.C. A Short History of Urban Forestry in Europe. *Arboriculture & Urban Forestry*, 1997, vol. 23, iss. 1, pp. 31–39. https://doi.org/10.48044/jauf.1997.004

28. Niemelä J., Saarela S.-R., Söderman T., Kopperoinen L., Yli-Pelkonen V., Väre S., Kotze D.J. Using the Ecosystem Services Approach for Better Planning and Conservation of Urban Green Spaces: a Finland Case Study. *Biodiversity and Conservation*, 2010, vol. 19, pp. 3225–3243. https://doi.org/10.1007/s10531-010-9888-8

29. Reuter A.-L., von der Lippe M. Conceptual Ideas to Combine Biodiversity Experience and Nature Conservation in Historical Urban Parks. *Urban Biodiversity & Design. Implementing the Convention on Biological Diversity in Towns and Cities*: Third Conference of the Competence Network Urban Ecology (Book of Abstracts). Germany, Bonn, 2008, 199 p.

30. Sirong L. Research on Landscape Design of Urban Park, 2012. *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS*). Wuhan, Hubei University of Technology, 2012, pp. 174–178.

31. Summit J., McPherson E.G. Residential Tree Planting and Care: a Study of Attitudes and Behavior in Sacramento, California. *Arboriculture & Urban Forestry*, 1998, vol. 24, iss. 2, pp. 89–97. https://doi.org/10.48044/jauf.1998.012

32. Viskari E.-L., Kärenlampi L. Roadside Scots Pine as an Indicator of Deicing Salt Use – A Comparative Study from Two Consecutive Winters. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, vol. 122, pp. 405–419. https://doi.org/10.1023/A:1005235422943

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 630*52:630*231
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-35-49

Динамика биометрических и углеродных показателей сосновых насаждений на залежных землях Красноярской лесостепи

А.А. Вайс*[1]✉*, д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: AAC-7051-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4965-3670*
Г.С. Вараксин*[2]*, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: HNJ-3503-2023, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4335-4784*
С.К. Мамедова*[1]*, аспирант; *ResearcherID: ABB-6484-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9972-0021*
А.А. Андронова*[1]*, аспирант; *ResearcherID: KFB-0481-2024, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7079-0819*
[1]Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; vais6365@mail.ru✉, mamedova_ceva@mail.ru, economics25192715@gmail.com
[2]Институт леса им. В.Н. Сукачёва Красноярского научного центра СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; varaksings@mail.ru

Поступила в редакцию 08.10.23 / Одобрена после рецензирования 23.12.23 / Принята к печати 26.12.23

Аннотация. Сегодня серьезной проблемой является зарастание древесно-кустарниковой растительностью бывших аграрных земель. Цель исследования – изучение возрастных изменений таксационных показателей древостоев залежных земель. Учет временного фактора при мониторинге бюджета углерода позволяет выявить ряд процессов динамики депонирования углерода, которые невозможно оценить при однократном исследовании. Для решения этой задачи проанализированы данные постоянных пробных площадей в 2011 г. с повторным обмером в 2023 г. Пробные площади расположены на залежах на границе ареала Красноярской лесостепи. Динамика процесса зарастания и развития насаждений показала, что по мере формирования залежей кроме доминирующих сосны (*Pinus sylvestris* L.), березы (*Betula pendula* Roth), осины (*Populus tremula* L.) встречаются лиственница (*Larix sibirica* Ledeb.), ель (*Picea obovata* Ledeb.) и ива (*Salix caprea* L.). Динамический процесс сосновых залежей установлен за период 15–27 лет после забрасывания земель. Смешанные насаждения различного сукцессионного происхождения имели возраст 10–30 лет. На участках наблюдались различные процессы изменения густоты залежей (зарастание, изреживание). Лесовосстановление залежей происходит от стены леса и при расстоянии до 50 м продолжается после 30 лет. Для залежей характерны все возможные формы зарастания: куртинная, биогруппами, сплошная, одиночные деревья. Средняя количественная оценка показала, что наиболее интенсивные изменения высоты, диаметра, высоты начала кроны, высоты максимального диаметра кроны и диаметров крон происходили на пробной площади, где наблюдалась минимальная густота, которая в динамике уменьшалась. На участке с максимальной густотой морфологические показатели характеризовались средним приростом. Минимальные изменения зафиксированы на пробной площади, где густота значительно возросла за 12 лет. Интенсивность роста деревьев одного диаметра в высоту больше

© Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Андронова А.А., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

в 2023 г. в сравнении с 2011 г. Возможно, на это оказывал влияние комплекс внешних и внутренних факторов, в т. ч. климатические изменения. Для оценки углеродной продуктивности древостоев залежей целесообразно применять регрессионные уравнения, разработанные для конкретной местности. Результаты исследования динамики депонирования углерода молодняками на залежных землях указывают на целесообразность использования постаграрных земель для реализации лесоклиматических проектов.
Ключевые слова: залежные земли, постаграрные земли, динамика зарастания, зарастание залежных земель, таксационные показатели, продуктивность древостоя
Благодарности: Исследование проводилось в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для реализации проекта «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» (№ FEFE-2024-0029) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

Для цитирования: Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Андронова А.А. Динамика биометрических и углеродных показателей сосновых насаждений на залежных землях Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 35–49. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-35-49

Original article

Dynamics of Biometric and Carbon Indicators of Pine Plantations Growing on the Abandoned Farmlands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe

Andrey A. Vais[1]✉***,*** *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAC-7051-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4965-3670*
Gennadij S. Varaksin[2]***,*** *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: HNJ-3503-2023, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4335-4784*
Sevinch K. Mamedova[1]***,*** *Postgraduate Student; ResearcherID: ABB-6484-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9972-0021*
Alina A. Andronova[1]***,*** *Postgraduate Student; ResearcherID: KFB-0481-2024, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7079-0819*
[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety "Krasnoyarskiy rabochiy", 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vais6365@mail.ru✉, mamedova_ceva@mail.ru, economics25192715@gmail.com
[2]Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS", Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; varaksings@mail.ru

Received on October 8, 2023 / Approved after reviewing on December 23, 2023 / Accepted on December 26, 2023

Abstract. Today, the overgrowth of woody and shrubby vegetation on former agricultural lands is a serious problem. The aim of this research has been to investigate age-related changes in the forest inventory indicators of forest stands on abandoned farmlands. Taking into account the temporal factor when monitoring the carbon budget allows identifying a number of processes in the dynamics of carbon sequestration that cannot be estimated in a single study. To address this issue, data from permanent sample plots have been analyzed in 2011 with repeated measurements in 2023. The sample plots are located on the abandoned farmlands on the border of the Krasnoyarsk forest-steppe area. The dynamics of the process of

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

overgrowth and development of plantations has shown that as the abandoned farmlands form, in addition to the dominant Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth) and aspen (*Populus tremula* L.), Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) and goat willow (*Salix caprea* L.) are also found. The dynamic process of pine abandoned farmlands has been established over a period of 15 to 27 years after land abandonment. The mixed plantations of various successional origins have ranged in age from 10 to 30 years old. Various processes have been observed in the research plots in terms of changes in the density of abandoned farmlands (overgrowth, thinning). The reforestation of abandoned farmlands occurs from the forest border and at a distance of up to 50 m continues after 30 years. The abandoned farmlands are characterized by various forms of overgrowth: clumps, biogroups, complete and by single trees. The average quantitative assessment has shown that that the most intense changes in height, diameter, height to the crown base, height to the largest crown width, and crown diameters have occurred in the test area where the minimum density has been observed, which has been decreasing dynamically. In the plot with the maximum density, morphological indicators have been characterized by an average increase. Minimal changes have been recorded in the sample plot where the density has increased significantly over 12 years. The growth rate of trees of the same diameter in height has been greater in 2023 compared to 2011. It is possible that this has been influenced by a combination of external and internal factors, including climate change. To assess the carbon productivity of forest stands growing on the abandoned farmlands, it is advisable to use regression equations developed for a specific area. The results of the study of the dynamics of carbon sequestration by young forests growing on the abandoned farmlands indicate the feasibility of using postagrarian lands for the implementation of forest climate projects.
Keywords: abandoned farmlands, postagrarian lands, overgrowth dynamics, overgrowth of the abandoned farmlands, forest inventory indicators, forest stand productivity
Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of the project “Dynamics of Restoration of Taiga Forests of Central Siberia Disturbed by Insect Pests” (no. FEFE-2024-0029) by the staff of the “Forest Ecosystems” scientific laboratory.

For citation: Vais A.A., Varaksin G.S., Mamedova S.K., Andronova A.A. Dynamics of Biometric and Carbon Indicators of Pine Plantations Growing on the Abandoned Farmlands of the Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 35–49. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-35-49

Введение

В настоящее время серьезной проблемой является зарастание древесно-кустарниковой растительностью бывших аграрных земель, которые по большей части в конце 90-х гг. оказались невостребованными для ведения сельского хозяйства.

По мнению ряда авторов, процессы зарастания, лесовосстановления имеют разные скорость и цикличность [4, 8, 21–23]. Так, Е.А. Домнина с соавт. [8] на основе анализа спутниковых снимков установили, что зарастание постаграрных площадей проходит неоднородно (гетерогенно). Естественное возобновление на залежах малой площади одновременное, а на больших территориях – идет от стены леса, со временем постепенно удаляясь от нее. Признаки агрогенного воздействия на залежных землях сохраняются до 50 лет [19].

В исследовании процессов зарастания постаграрных земель большую роль играет учет сукцессионного развития растительности [5–7, 11, 14]. При

выращивании высокопродуктивных древесных насаждений на бывших сельскохозяйственных площадях необходимо принимать во внимание ряд факторов: эколого-лесоводственные особенности древесной породы, почвенные условия местопроизрастания [7]; площадь, густоту, возраст и запас фитомассы древесной растительности [14]. Таксационные показатели формирующихся древостоев зависят от удаленности материнского полога [11].

В процессе естественного лесовосстановления залежных земель необходимо уделять внимание сохранению и оценке состояния насаждений этих территорий [1, 10, 12, 17]. Значительную роль в таком мониторинге играют методы дистанционного зондирования [12]. При формировании насаждений на залежных землях существует высокая опасность патогенных заболеваний [10] и лесных пожаров [17].

По мере роста и развития насаждений на постаграрных территориях все острее становится проблема оценки продуктивности древостоев [1–3, 9, 25, 26]. Для сосновых молодняков залежных земель характерна высокая густота, которая определяет структуру всего древостоя. В связи с этим с целью повышения продуктивности чистых сосняков необходимо своевременно проводить рубки ухода [1]. По данным Л.В. Голубевой с соавт. [2], постаграрные сосновые насаждения, сформированные на залежах возрастом более 40 лет, интенсивно растут и имеют близкое к нативным насаждениям качество древесины.

Важную функцию залежные земли могут выполнять при реализации лесоклиматических проектов и обустройстве карбоновых ферм [18, 20, 24, 27]. А.А. Романовская с соавт. [20] отмечают, что общая площадь постаграрных земель в Российской Федерации составляет 21,6 млн га, при этом максимальная аккумуляция углерода наблюдается в центральных областях европейской части России, на юге Восточной Сибири и Дальнем Востоке. С точки зрения смягчения климатических изменений, по мнению ряда ученых, эффективны системы агролесоводства [31, 34]. При создании карбоновых ферм необходимо учитывать ряд факторов, которые актуальны для постаграрных земель: свойство территории, плодородие земли, фотосинтетический потенциал растений [16].

Анализ состояния вопроса позволяет констатировать, что временной фактор является доминирующим для процессов лесовосстановления, состояния и роста формирующихся на залежных землях насаждений. Исходя из этого, целью данного исследования стало изучение возрастных изменений (динамики) биометрических и углеродных показателей древостоев на таких землях.

Объекты и методы исследования

Проанализированы данные 8 постоянных пробных площадей (ПП), расположенных на залежах на границе ареала Красноярской лесостепи, в 2011 г. с повторным обмером в 2023 г. Учет временного фактора в процессе мониторинга бюджета углерода позволяет выявить ряд процессов динамики депонирования углерода, которые было бы невозможно пронаблюдать в случае однократного исследования. Общее представление о развитии насаждений дает их таксационное описание (табл. 1). Динамика процесса роста выявлена на 3 участках (ПП-1–3).

Таблица 1

Динамика таксационной характеристики насаждений на залежных участках (2011–2023 гг.)
The dynamics of the inventory characteristics of forest plantations growing on the abandoned farmlands (2011–2023)

Участок	Год	Состав	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Сумма площадей сечений, м²/га	Число деревьев, шт./га	Бонитет	Тип леса	Расстояние от стены леса, м	Характер зарастания	Тип сукцессии
ПП-1	2011	98С2Б	15	6,0	7,1	24,79	6182	III	$С_{мпк}$	25–50	Сплошное	СС
	2023	94С4Л2Б	27	8,8	8,8	50,37	8240		$С_{ртр}$			
ПП-2	2011	93С7Б	15	4,2	4,8	17,00	9465	III	$С_{мпк}$	50–55		
	2023	94С4Л2Б	27	8,8	8,8	50,37	8240		$С_{ртр}$			
ПП-3	2011	94С2Л2Е2Б	15	3,5	4,2	2,98	2154	IV	$С_{вртр}$	100–105	Биогруппа	
	2023	96С2Л2Е	27	10,4	14,4	30,41	1880	II	$С_{ртр}$		Сплошное	
ПП-4	2023	100С	27	7,9	14,7	21,06	1240	III		250	Биогруппа	
ПП-5	2011	54С42Б4Ив	15	С – 4,0 Б – 5,0 Ив – 3,2	С – 4,3 Б – 3,8 Ив – 3,4	С – 6,79 Б – 4,14 Ив – 0,27	С – 4600 Б – 3600 Ив – 300	III		150	Сплошное	СМС
ПП-6	2011	80Б20Ив	10	6,3	Б – 4,8 Ив – 4,0	Б – 6,66 Ив – 1,13	Б – 3700 Ив – 900	I	$Б_{кп}$	180		ПС
ПП-7	2023	88Ос12Ив	15	Ос – 5,3 Ив – 5,9	6,2	Ос – 17,74 Ив – 2,97	Ос – 8154 Ив – 1077	III	$Ос_{ртр}$	150		ОС
ПП-8	2023	91Б9С	30	Б – 7,8 С – 4,4	12,3	Б – 46,78 С – 1,52	Б – 9833 С – 1000	III	$Б_{ртр}$	200		БС

Примечание: $С_{мпк}$, $С_{ртр}$, $С_{вртр}$ – мертвопокровный, разнотравный и вейниково-разнотравный сосняки соответственно; $Б_{кп}$, $Б_{ртр}$ – кипрейный и разнотравный березняки соответственно; $Ос_{ртр}$ – разнотравный осинник; СС, СМС, ПС, ОС, БС – сосновая, смешанная, пирогенная, осиновая и березовая сукцессии соответственно.

В основу исследований как в 2011 г., так и в 2023 г. положены методика ленточного перечета и измерение основных морфологических показателей учетных растущих деревьев по ступеням толщины. Кроме этого, на каждой из 3 пробных площадей отобраны по 3 модельных дерева для оценки фитомассы отдельных фракций в соответствии с общепринятой методикой [15].

С использованием данных измерений модельных деревьев по ступеням толщины выполнен статистический анализ с оценкой точечных периодических средних арифметических показателей, характеризующих динамику растущих деревьев (табл. 2).

$$\text{ДТО}_{\Delta} = \frac{БП_{A}}{БП_{A-n}},$$

где $БП_{A}$, $БП_{A-n}$ – средние биометрические показатели деревьев текущего возраста и деревьев n лет назад.

Таблица 2

Средняя периодическая динамика морфологических показателей модельных деревьев сосны (2011–2023 гг.)
The average periodic dynamics of the morphological parameters of model pine trees (2011–2023)

Участок	Год	Диаметр, см	Высота			Диаметр кроны, м	
			дерева, м	начала кроны, м	максимального диаметра кроны, м	С–Ю	З–В
ПП-1	2011	8,0±0,90	6,4±0,33	2,8±0,16	3,8±0,26	2,5±0,38	2,5±0,39
	2023	9,2±1,21	8,4±0,63	3,4±0,32	5,7±0,50	2,4±0,21	2,6±0,26
	Динамика	1,15	1,31	1,21	1,50	0,96	1,04
ПП-2	2011	5,1±0,67	3,9±0,18	1,6±0,15	2,2±0,18	1,7±0,13	2,0±0,20
	2023	10,7±1,49	9,6±0,70	4,9±0,43	6,7±0,61	3,5±1,02	2,5±0,21
	Динамика	2,10	2,46	3,06	3,05	2,06	1,25
ПП-3	2011	4,4±0,53	3,3±0,29	0,3±0,03	1,2±0,13	1,3±0,08	1,2±0,07
	2023	12,3±1,22	9,8±0,41	3,5±0,32	6,9±0,32	2,8±0,28	2,7±0,26
	Динамика	2,80	2,97	11,67	5,75	2,15	2,25

Примечание: Оценка выполнена при уровне доверительной вероятности 95,4 %. Все значения статистики достоверны по критерию Стьюдента, поскольку $t_{ф} > t_{табл}$.

Изменения высот деревьев по диаметрам устанавливались на основе регрессионного анализа с применением 2-параметрического нелинейного уравнения:

$$H = 1{,}3 + \left(\frac{d}{a + bd}\right)^{3},$$

где H – высота дерева, м; d – диаметр дерева на высоте 1,3 м, см; a, b – коэффициенты уравнения.

Выбор метода обусловлен исследованиями А.В. Лебедева [13], который считает, что из метода множества функций, отражающих связь высот и диаметров, наибольшее распространение получила функция Näslund. Обработка материала выполнялась в программах Excel и Statgraphics с использованием процедур статистического и нелинейного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Данные о динамике процесса зарастания и развития насаждений (2011–2023 гг.) показали, что по мере формирования залежей кроме доминирующих сосны (*Pinus sylvestris* L.), березы (*Betula pendula* Roth), осины (*Populus tremula* L.) присутствуют лиственница (*Larix sibirica* Ledeb.), ель (*Picea obovata* Ledeb.) и ива (*Salix caprea* L.). Можно констатировать, что в процессе зарастания формируются как чистые сосновые, так и смешанные насаждения, различные по составу и происхождению. Древостои имели возраст с 10 до 30 лет. На участках с фиксированием изменений показателей в 2011 г. насаждения характеризовались возрастом 15 лет, а в 2023 г. – 27 лет.

На пробных участках наблюдались различные процессы изменения густоты залежей (зарастание, изреживание). На ПП-1 густота возросла (процесс зарастания), что выразилось в незначительном увеличении средних высоты (6,0–8,8 м) и диаметра (7,1–8,8 см). При этом сумма площадей поперечного сечения увеличилась более чем в 2 раза (24,79–50,37 м^2/га). На ПП-2, 3 наблюдалось снижение густоты (изреживание). На ПП-2 при достаточно высокой густоте (8240–9465 шт./га) абсолютная полнота возросла за 12 лет почти в 3 раза (17,00–50,37 м^2/га). На ПП-3 при низкой густоте (1880–2154 шт./га) сумма площадей сечений деревьев увеличилась более чем в 15 раз (2,98–30,41 м^2/га), но при этом не достигла максимума (50,37 м^2/га).

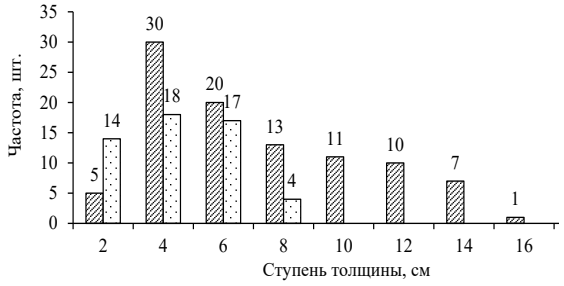
Сосняки характеризуются III классом бонитета. При небольшой густоте и протекании процесса изреживания молодняки могут достигать II класса бонитета. Лиственные древостои (березняки) на залежах с благоприятными условиями произрастания соответствуют I классу бонитета.

Типологическая структура менялась от мертвопокровных или вейниково-разнотравных сосняков до разнотравных. Процесс зарастания залежей происходит от стены леса и при расстоянии до 50 м продолжается после 30 лет. Для залежей характерны все формы зарастания: куртинная, биогруппами, сплошная, одиночные деревья.

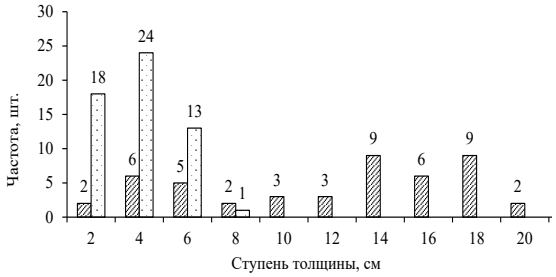
Эндогенные и экзогенные условия оказывают влияние на морфологическую структуру молодняков.

Средняя количественная оценка показывает наиболее интенсивные изменения высоты, диаметра, высоты начала кроны, высоты максимального диаметра кроны и диаметров крон на ПП-3, где наблюдалась минимальная густота, которая в динамике уменьшалась. На ПП-2 густота являлась максимальной со снижением в динамике, при этом морфологические показатели характеризовались средним приростом. Минимальные изменения зафиксированы на ПП-1, где густота значительно возросла за 12 лет. Средние показатели достоверны по критерию Стьюдента.

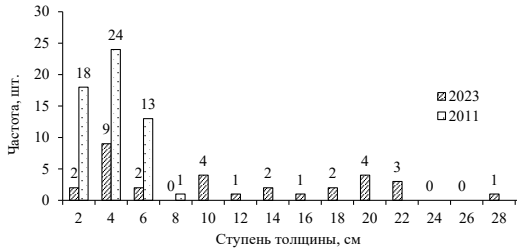
Визуальное изменение распределения деревьев по ступеням толщины представлено на рис. 1. Видно, что ряды становятся более растянутыми с началом формирования деревьев следующего поколения (ПП-2, 3). В результате даже в условиях снижения густоты в окнах полога продолжается зарастание.



а



б



в

Рис. 1. Динамика структуры сосновых молодняков по ступеням толщины (2011–2023 гг.): *а* – ПП-1; *б* – ПП-2; *в* – ПП-3

Fig. 1. The dynamics of the structure of young pine stands by diameter class (2011–2023): *а* – SP-1; *б* – SP-2; *в* – SP-3

Интересным с точки зрения оценки динамики зарастания является изучение заранее известной закономерности в соотношении высот и диаметров деревьев. В последние годы получили распространение смешанные модели [28–30, 32, 33].

Оценка динамики роста на основе линий регрессий выполнялась с учетом классических математических моделей, используемых для визуализации диаграмм высот. На рис. 2 изображены линии соотношения высот и диаметров в разные временные отрезки (2011 и 2023 гг.).

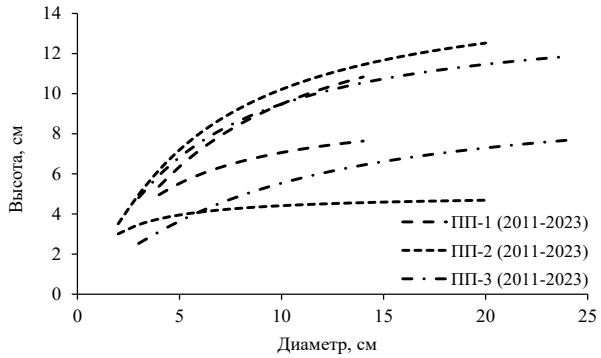


Рис. 2. Соотношение высот и диаметров деревьев сосны в условиях залежей (2011–2023 гг.)

Fig. 2. The ratio of heights to diameters of pine trees growing on the abandoned farmlands (2011–2023)

В табл. 3 представлены теоретические и эмпирические модели, демонстрирующие на основе данных о диаметрах рост высот деревьев сосны на залежных землях за период 2011–2023 гг.

Таблица 3

Регрессионные уравнения высот сосны и их оценка с учетом диаметров деревьев и года наблюдений

The regression equations of pine tree heights and their estimation in relation to the diameters of the trees and the year of observation

Участок	Год	Эмпирическое уравнение	R^2	m	$K_{Д-У}$	$K_а$
ПП-1	2011	$H = 1,3 + (d/(0,608 + 0,497d))^3$	77,6	0,4	1,1	Слабая
	2023	$H = 1,3 + (d/(0,863 + 0,410d))^3$	93,0	0,5	2,6	
ПП-2	2011	$H = 1,3 + (d/(0,378 + 0,647d))^3$	57,3	0,3	1,0	Умеренная
	2023	$H = 1,3 + (d/(0,713 + 0,411d))^3$	88,7	0,7	2,8	
ПП-3	2011	$H = 1,3 + (d/(1,350 + 0,483d))^3$	88,8	0,3	2,1	Слабая
	2023	$H = 1,3 + (d/(0,693 + 0,427d))^3$	80,3	0,6	2,5	

Примечание: R^2 – коэффициент детерминации, %; m – основная ошибка, м; $K_{Д-У}$ – коэффициент Дарбина–Уотсона; $K_а$ – коэффициент автокорреляции. Коэффициенты уравнений значимы, поскольку $p < 0,05$. Параметры уравнений получены с использованием метода итерации.

Коэффициент детерминации уравнений менялся от 57,3 до 99,0 %, т. е. их адекватность достаточно высокая – >50 %. Основная ошибка не превысила 0,7 м. Коэффициент Дарбина–Уотсона – 1,0–2,8; это говорит о положительной автокорреляции. Связь между высотами ряда слабо-умеренная и не указывает на влияние отдельного фактора.

Следует отметить, что при максимальной густоте (ПП-2) в 2011 г. наблюдается элиминация деревьев старших рангов.

Во всех случаях высота деревьев одного диаметра в 2023 г. больше, чем в 2011 г. (для ПП-1 разница 2,5 м; для ПП-2 – 2,8 м; для ПП-3 – 2,2–4,0 м). При этом только на ПП-1 наблюдалось увеличение густоты, на ПП-2, 3 плотность

снижалась при интенсивном росте абсолютной полноты. Возможно, сказался замедленный рост одиночных деревьев на первичном этапе развития сосняков. Таким образом, с определенной долей вероятности можно утверждать, что на рост молодняков оказывают значимое влияние и внешние факторы, в т. ч. климатические изменения.

Для оценки углеродной продуктивности сосновых молодняков выполнен подеревный расчет углерода для всей надземной биомассы дерева в килограммах абсолютно сухого веса. С этой целью использовались регрессионные модели, представленные в «Методике количественного определения объема поглощений парниковых газов», утвержденной приказом Минприроды России от 27 мая 2022 г. № 371. В общем виде эмпирическое уравнение для деревьев сосны выглядит так:

$$C_1 = 0{,}5 \sum(0{,}0217 d^2 H)^{0{,}9817},$$

где 0,5 – коэффициент пересчета биомассы в углеродные единицы.

Второе уравнение получено для сосновых молодняков, произрастающих на залежных землях на границе Красноярской лесостепи (II разряд продуктивности):

$$C_2 = 0{,}5 \cdot 0{,}377 \sum(0{,}309 d)^{2{,}281}.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Динамика углеродной продуктивности сосновых молодняков залежи (2011–2023 гг.)
The dynamics of carbon productivity of young pine stands growing on the abandoned farmlands (2011–2023)

Участок	Год	Расстояние от стены леса, м	Углеродная продуктивность сосняков, тС · га$^{-1}$		
			C_1	C_2	Разница, %
ПП-1	2011	25–55	20,22	33,43	+65,3
	2023		34,36	43,35	+26,2
	Прирост, %		+69,9	+29,7	–
ПП-2	2011		8,88	21,21	+138,5
ПП-3	2011	100–105*	1,27	3,58	+181,9
	2023		25,61	31,89	+24,5
	Прирост, %		+1916,5	+790,8	–

*Биогруппа с последующим зарастанием.

Данные показывают, что использование регрессионных уравнений, отражающих местные условия произрастания, позволяет более точно оценить продуктивность конкретного участка. Во всех случаях эмпирическое уравнение для расчета C_1 в значительной степени занижает оценку углеродной продуктивности сосновых молодняков. Фактическое депонирование углерода за период 2011–2023 гг. возросло на ПП-1 в 1,3 раза, а на ПП-3 – в 8,9 раза. На ПП-3 первоначально (2011 г.) деревья росли биогруппами, в 2023 г. выявлено сплошное зарастание, что и объясняет такой интенсивный рост.

Выводы

1. Состав чистых сосновых молодняков на залежах с годами практически не меняется, появляются в небольшом количестве деревья лиственницы. Древостои достаточно разнообразны по составу и происхождению.

2. Динамика густоты молодняков разнонаправленна в зависимости от конкретных условий (изреживание перегущенных участков; сплошное зарастание участков с биогруппами).

3. Вне зависимости от густоты молодняки за 12 лет в значительной степени увеличили абсолютную полноту (в 3–15 раз), что говорит о перспективности использования данных площадей с целью реализации лесоклиматических проектов.

4. Процесс зарастания залежей продолжается, на что указывает анализ динамики строения молодняков по диаметру.

5. Интенсивность роста деревьев одного диаметра в высоту больше в 2023 г. в сравнении с 2011 г. Возможно, на это оказывает влияние комплекс внешних и внутренних факторов, в т. ч. климатические изменения.

6. Использование регрессионных нелинейных моделей позволяет определить приростные высоты с учетом диаметров и временных изменений в росте деревьев.

7. Средняя количественная оценка показала, что наиболее интенсивные изменения высоты, диаметра, высоты начала кроны, высоты максимального диаметра кроны и диаметров крон произошли на пробной площади, где наблюдалась минимальная густота, которая в динамике уменьшалась.

8. Для определения углеродной продуктивности древостоев залежей целесообразно применять местные регрессионные уравнения, которые позволяют более точно оценить интенсивность депонирования углерода в сравнении с общероссийской методикой.

9. Исследование динамики депонирования углерода молодняками на залежных землях указывает на целесообразность использования постаграрных земель для реализации лесоклиматических проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Березин А.А., Савиных Н.П.* Постагрогенные сосняки в средней тайге (на примере Кировской области) // Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Киров: ВятГУ, 2019. С. 17–22.

Berezin A.A., Savinykh N.P. Postagrogenic Pine Forests in the Middle Taiga (Case Study of Kirov Oblast). *Conservation of Forest Ecosystems: Problems and Ways to Solve Them*: Materials of the II International Scientific and Practical Conference. Kirov, Vyatka State University, 2019, pp. 17–22. (In Russ.).

2. *Голубева Л.В., Наквасина Е.Н., Минин Н.С.* Продуктивность и качество древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в постагрогенных насаждениях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. Вып. 215. С. 19–29.

Golubeva L.V., Nakvasina E.N., Minin N.S. Productivity and Wood Quality of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Postagrogenic Plantations. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnichesskoj akademii*, 2016, iss. 215, pp. 19–29. (In Russ.). https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.19-29

3. *Грибов С.Е., Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Евдокимов И.В.* Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 19–25.

Gribov S.E., Korchagov S.A., Khamitov R.S., Evdokimov I.V. Productivity of Stands Formed on Agricultural Lands. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 19–25. (In Russ.). https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-19-25

4. *Данилов Д.А., Богданова Л.С., Мандрыкин С.С., Яковлев А.А., Сергеева А.С.* Влияние плодородия почвы на естественное возобновление леса на старопахотных землях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2019. Вып. 229. С. 145–163.

Danilov D.A., Bogdanova L.S., Mandrykin S.S., Yakovlev A.A., Sergeyeva A.S. Influence of Soil Fertility on the Natural Restoration of Forest on Old Agricultural Lands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnichesskoj akademii*, 2019, iss. 229, pp. 145–163. (In Russ.).

5. *Данилов Д.А., Жигунов А.В., Рябинин Б.Н., Вайман А.А.* Оценка состояния лесных и постагрогенных почв Ленинградской области и перспективы интенсивного лесовыращивания на этих территориях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2018. Вып. 223. С. 47–63.

Danilov D.A., Zhigunov A.V., Ryabinin B.N., Vaiman A.A. Assessment of the Condition of Forest and Postagrogenic Soils of the Leningrad Region and Prospects of Intensive Forest Growth in These Areas. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnichesskoj akademii*, 2018, iss. 223, pp. 47–63. (In Russ.).

6. *Данилов Д.А., Зайцев Д.А., Януш С.Ю., Вайман А.А.* Проблематика использования постагрогенных земель для выращивания древесных насаждений // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2021. Т. 1. С. 143–146.

Danilov D.A., Zaitsev D.A., Yanush S.Yu., Vaiman A.A. Problems of Using Postagrogenic Lands for Growing Forest Stands. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education*: Materials of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference. St. Petersburg, Saint Petersburg State Forest Technical University, 2021, vol. 1, pp. 143–146. (In Russ.).

7. *Данилов Д.А., Рябинин Б.Н., Януш С.Ю.* Создание насаждений сосны и ели на залежных землях Северо-Запада России // Междунар. журн. гуманит. и естеств. наук. 2018. № 7. С. 106–110.

Danilov D.A., Ryabinin B.N., Janusz S.Yu. Creation of Pine and Farming Plants on Deployable Land North-West of Russia. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* = International Journal of Humanities and Natural Sciences, 2018, no. 7, pp. 106–110. (In Russ.).

8. *Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я.* Мониторинг зарастания заброшенных земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым снимкам высокого разрешения // Теорет. и приклад. экология. 2022. № 3. С. 82–89.

Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Monitoring of Overgrowing of Abandoned Agricultural Lands Using High-Resolution Satellite Images. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology, 2022, no. 3, pp. 82–89. (In Russ.). https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-082-089

9. *Жигунов А.В., Данилов Д.А., Красновидов А.Н., Эндерс О.О.* Создание высокопродуктивных лесонасаждений на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного оборота // Вестн. Башкир. гос. аграр. ун-та. 2014. № 3(31). С. 85–90.

Zhigunov A., Danilov D., Krasnovidov A., Enders O. Creation of Highly Productive Plantations on Lands Withdrawn from Active Agrciculture. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik Bashkir State Agrarian University, 2014, no. 3(31), pp. 85–90. (In Russ.).

10. *Залесов С.В., Жижин С.М., Магасумова А.Г., Оплетаев А.С., Платонов Е.П.* Повышение эффективности использования бывших сельскохозяйственных угодий // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2022. Вып. 239. С. 104–116.

Zalesov S.V., Zhizhin S.M., Magasumova A.G., Opletaev A.S., Platonov E.P. Increasing the Efficiency of Former Agricultural Land Using. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnichesskoj akademii*, 2022, iss. 239, pp. 104–116. (In Russ.).

11. *Карпин В.А., Петров Н.В., Туюнен А.В.* Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднетаежной подзоны // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 120–129.

Karpin V.A., Petrov N.V., Tuyunen A.V. Regeneration of Forest Phytocoenoses after Various Agricultural Land Use Practices in the Conditions of Middle Taiga Subzone. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2017, no. 6, pp. 120–129. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/SJFS20170610

12. *Курбанов Э.А., Нуреева Т.В., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Мифтахов Т.Ф., Незамаев С.А., Полевщикова Ю.А.* Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье // Вестн. Марийск. гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 17–24.

Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N., Gubayev A.V., Leznin S.A., Miftakhov T.F., Nezamayev S.A., Polevshikova Y.A. Remote Monitoring of Disturbances in Forest Cover, Reforestation and Afforestation of Mari Zavolzhje. *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"* = Vestnik of the Mari State University. Series "Forest. Ecology. Nature Management", 2011, no. 3, pp. 17–24. (In Russ.).

13. *Лебедев А.В., Кузьмичев В.В.* Проверка двухпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди в березовых древостоях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 230. С. 100–113.

Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Verification of Bi-Parameter Models of Dependence Diameter on Breast Height in Birch Stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnichesskoj akademii*, 2020, iss. 230, pp. 100–113. (In Russ.).

14. *Лежнин С.А., Музурова Р.Л.* Оценка вторичной сукцессии на залежах Республики Марий Эл // Лесн. экосистемы в условиях изменения климата: биол. продуктивность и дистанц. мониторинг. 2019. № 5. С. 126–135.

Lezhnin S.A., Muzurova R.L. Estimation of Secondary Succession on the Abandoned Agricultural Lands in Mari El Republic. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyj monitoring* = Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring, 2019, no. 5, pp. 126–135. (In Russ.). https://doi.org/10.25686/6785.2019.5.58823

15. *Лукина Н.В., Данилова М.А., Иванова Е.А.* Методические рекомендации по отбору и камеральной обработке растительных образцов для оценки динамики запасов углерода в лесных, степных и тундровых экосистемах в части разработки системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах. Версия 2023-1. М., 2023. 27 с.

Lukina N.V., Danilova M.A., Ivanova E.A. *Guidelines for the Selection and Laboratory Processing of Plant Samples to Assess the Dynamics of Carbon Stocks in Forest, Steppe and Tundra Ecosystems in Terms of Developing a System for Ground-Based and Remote Monitoring of Carbon Pools and Greenhouse Gas Flows in the Russian Federation, Creating a System for Recording Data on Flows of Climate-Active Substances and Carbon Budget in Forests and Other Terrestrial Ecological Systems*: Version 2023-1. Moscow, 2023. 27 p. (In Russ.).

16. *Малыш Е.В.* Ренты карбоновых ферм на землях сельскохозяйственного назначения // Регион. проблемы преобразования экономики. 2021. № 10. С. 58–65.

Malysh E.V. Rents of Carbon Farms on Agricultural Land. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki* = Regional Problems of Transforming the Economy, 2021, no. 10, pp. 58–65. (In Russ.). https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-10-58-65

17. *Морозов А.С., Иванова Г.А., Бакшеева Е.О., Иванов В.А.* Пожароопасность сосновых молодняков на неиспользуемых сельскохозяйственных землях // Сиб. лесн. журн. 2020. № 3. С. 26–36.

Morozov A.S., Ivanova G.A., Baksheeva E.O., Ivanov V.A. Fire Hazard of Young Pine Stands on Unused Agricultural Lands. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2020, no. 3, pp. 26–36. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/SJFS20200303

18. *Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н.* Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 46–59.

Nakvasina E.N., Shumilova Yu.N. Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 46–59. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-46-59

19. *Пономарева Т.В., Пономарёв Е.И., Шишикин А.С., Швецов Е.Г.* Мониторинг трансформации старопахотных почв лесостепной зоны при лесовосстановлении // География и природ. ресурсы. 2018. № 2. С. 154–161.

Ponomareva T.V., Ponomarev E.I., Shishikin A.S., Shvetsov E.G. Monitoring of Transformation of Postagrogenic Soils in Forest-Steppe Zone during the Process of Reforestation. *Geografiya i prirodnye resursy* = Geography and Natural Resources, 2018, no. 2, pp. 154–161. (In Russ.).

20. *Романовская А.А., Гитарский М.Л., Карабань Р.Т., Назаров И.М.* Роль залежных земель России в поглощении диоксида углерода из атмосферы // Проблемы экол. мониторинга и моделирования экосистем. 2005. Т. 20. С. 219–237.

Romanovskaya A.A., Gitarskij M.L., Karaban' R.T., Nazarov I.M. The Role of Abandoned Farmlands in Russia in the Absorption of Carbon Dioxide from the Atmosphere. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2005, vol. 20, pp. 219–237. (In Russ.).

21. *Терехин Э.А.* Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи // Изв. Рос. акад. наук. Сер.: Геогр. 2022. Т. 86, № 4. С. 594–604.

Terekhin E.A. Reforestation on Abandoned Agricultural Lands in the Central-Russian Forest-Steppe. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 4, pp. 594–604. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2587556622040112

22. *Терехин Э.А.* Процессы лесовозобновления на залежах юго-запада Среднерусской возвышенности // Лесн. экосистемы в условиях изменения климата: биол. продуктивность и дистанц. мониторинг. 2016. № 2. С. 57–62.

Terekhin E.A. Reforestation on Abandoned Lands Southwest of Central Russian Upland. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivonost' i distantsionnyj monitoring* = Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring, 2016, no. 2, pp. 57–62. (In Russ.).

23. *Терехин Э.А.* Состояние залежных земель и особенности их спектрально-отражательных свойств на территории Среднерусской лесостепи // Регион. геосистемы. 2022. Т. 46, № 3. С. 356–365.

Terekhin E.A. Parameters of Abandoned Agricultural Lands and Their Reflectance in the Central Russian Forest-Steppe. *Regional'nye ekosistemy* = Regional Geosystems, 2022, vol. 46, no. 3, pp. 356–365. (In Russ.). https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-356-365

24. *Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Изменение величины и структуры углерода в регионах южной тайги и лесостепи Европейской России за исторический период // Живые и биокос. системы. 2017. № 19. Ст. № 2. Режим доступа: https://jbks.ru/assets/files/content/2017/issue19/article-2.pdf (дата обращения: 17.10.24).

Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Changes of Organic Carbon Pools in the Southern Taiga and Forest-Steppe of European Russia during the Historical Period. *Zhivye i biokosnye sistemy* = Live and Bio-Abiotic Systems, 2017, no. 19, art. no. 2. (In Russ.).

25. *Янбаев Ю.А., Тагиров В.В., Бахтина С.Ю., Тагирова А.А.* Динамика роста подроста сосны обыкновенной на неосваиваемых землях // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2018. № 4(72). С. 150–151.

Yanbaev Yu.A., Tagirov V.V., Bakhtina S.Yu., Tagirova A.A. The Dynamics of Scots Pine Undergrowth Development on Abandoned Lands. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University, 2018, no. 4(72), pp. 150–151. (In Russ.).

26. *Януш С.Ю., Данилов Д.А., Красновидов А.Н., Иванов А.А.* Фитомасса 10-летних насаждений сосны на залежных землях Ленинградской области // Актуал. проблемы лесного комплекса. 2018. № 53. С. 55–57.

Yanush S.Yu., Danilov D.A., Krasnovidov A.N., Ivanov A.A. Phytomass of 10 Year Old Trees Pine on Unused Agricultural Land Leningrad Region. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2018, no. 53, pp. 55–57. (In Russ.).

27. Belay B., Pötzelsberger E., Sisay K., Assefa D., Hasenauer H. The Carbon Dynamics of Dry Tropical Afromontane Forest Ecosystems in the Amhara Region of Ethiopia. *Forests*, 2018, vol. 9, no. 1, art. no. 18. https://doi.org/10.3390/f9010018

28. Camacho E.A.R., Rivas S.C., Hernández J.A.L., Duran A.A.C., Carmona J.X., Nagel J. Generalized Height-Diameter Models with Random Effects for Natural Forests of Central Mexico. *CERNE*, 2022, vol. 28, art. no. e-103033. https://doi.org/10.1590/01047760202228013033

29. Feraz Filho A.C., Mola-Yudego B., Ribeiro A., Scolforo J.R.S., Loos R.A., Scolforo H.F. Height-Diameter Models for *Eucalyptus* sp. Plantations in Brazil. *CERNE*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 9–17. https://doi.org/10.1590/01047760201824012466

30. Hofiço N.S.A., Costa E.A., Fleig F.D., Finger C.A.G., Hess A.F. Height-Diameter Relationships for *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden in Mozambique: Using Mixed-Effects Modeling Approach. *CERNE*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 183–192. https://doi.org/10.1590/01047760202026022677

31. Lutter R., Stål G., Arnesson Ceder L., Lim H., Padari A., Tullus H., Nordin A., Lundmark T. Climate Benefit of Different Tree Species on Former Agricultural Land in Northern Europe. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 12, art. no. 1810. https://doi.org/10.3390/f12121810

32. Ogana F.N., Corral-Rivas S., Gorgoso-Varela J.J. Nonlinear Mixed-Effect Height-Diameter Model for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus radiata* D. Don. *CERNE*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 150–161. https://doi.org/10.1590/01047760202026012695

33. Salas-Eljatib C., Corvalán P., Pino N., Donoso P. J., Soto D.P. Modelos de Efectos Mixtos de Altura-Diámetro para Drimys Winteri en el Sur (41-43° S) de Chile = Mixed-Effects Height-Diameter Models for *Drimys winteri* in the South (41-43° S) of Chile. *BOSQUE* (*Valdivia*), 2019, vol. 40, no. 1, pp. 71–80. (In Span.). https://doi.org/10.4067/S0717-92002019000100071

34. Xie X., Cui J., Shi W., Liu X., Tao X., Wang Q., Xu X. Biomass Partition and Carbon Storage of *Cunninghamia lanceolata* Chronosequence Plantations in Dabie Mountains in East China. *Dendrobiology*, 2016, vol. 76, pp. 165–174. http://dx.doi.org/10.12657/denbio.076.016

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

---

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Original article
УДК 582.475:630*329:581.143.28
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-50-65

Double-Cropping of *Pinus sylvestris* L. Containerized Seedlings under Short Growing Season Conditions at High Latitudes

Elena V. Robonen*[1], *Research Scientist; *ResearcherID: AAD-1958-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7926-8672*
Nadezhda P. Chernobrovkina*[1]✉, *Doctor of Biology, Assoc. Prof., Leading Research Scientist; *ResearcherID: K-6120-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9716-003X*
Boris V. Raevsky*[1], *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof., Leading Research Scientist; *ResearcherID: K-6424-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1315-8937*
Maria I. Zaitseva*[2,3], *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; *ResearcherID: P-2238-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4209-2815*
Karina G. Nelaeva*[1], *Postgraduate Student, Junior Research Scientist; *ResearcherID: GYJ-7223-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3283-4451*
[1]Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; er51@bk.ru, chernobrovkina50@bk.ru✉, borisraevsky@gmail.com, nelaevakg@krc.karelia.ru
[2]Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; 2003bk@bk.ru
[3]Murmansk State Technical University, ul. Sportivnaya, 13, Murmansk, 183010, Russian Federation; 2003bk@bk.ru

Received on June 11, 2023 / Approved after reviewing on September 3, 2023 / Accepted on September 5, 2023

Abstract. The quality of forest crops significantly depends on the characteristics of the planting stock. To obtain high-quality conifer seedlings, the process of container cultivation is used and optimized and a double-cropping mode is introduced. The aim of this study has been to conduct a comparative analysis of one-year-old containerized seedlings of *Pinus sylvestris* L. according to morphometric parameters under a double-cropping regime under short growing season conditions at high latitudes. The experiment has been carried out in a forest nursery in southern Karelia, Russia. The duration of the first rotation (1rot) has been 146 days, the second one (2rot) – 91 days, the control one (0rot) – 132 days. The following parameters of seedlings have been determined: seedling height (SH, cm), root length (cm), bud length (mm), root collar diameter (RCD, mm), tree dry mass (TDM, g), shoot dry mass (SDM, g), root dry mass (RDM, g) and needle dry mass. The integral quality indices have been assessed, such as: shoot : root dry mass ratio (SRR) = SDM/RDM, sturdiness quotient (SQ) = SH(cm)/RCD(mm) and Dickson Quality Index (DQI) = TDM/(SH + SRR). The lowest values of seedling dry mass have been revealed in the 2rot variant. For all variants, the difference between the mean SQ and DQI values has been statistically significant at the $p < 0.05$ level. SRR was the lowest in the 1rot seedlings. The high correlation coefficients between the TDM and RCD for all variants confirm the high significance of the latter index. The results indicate the need to adjust the time regime and use additional agricultural practices to obtain high-quality planting stock.
Keywords: *Pinus sylvestris* L., seedling quality, morphometric parameters, quality index, DQI, forest nursery, double-cropping

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of federal budget under the state assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences).

For citation: Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Raevsky B.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Double-Cropping of *Pinus sylvestris* L. Containerized Seedlings under Short Growing Season Conditions at High Latitudes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 50–65. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-50-65

Научная статья

Двухротационное выращивание контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях короткого вегетационного периода в высоких широтах

***Е.В. Робонен*[1]**, *науч. сотр.; ResearcherID: AAD-1958-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7926-8672*
***Н.П. Чернобровкина*[1]✉**, *д-р биол. наук, доц., вед. науч. сотр.; ResearcherID: K-6120-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9716-003X*
***Б.В. Раевский*[1]**, *д-р с.-х. наук, доц., вед. науч. сотр.; ResearcherID: K-6424-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1315-8937*
***М.И. Зайцева*[2,3]**, *канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: P-2238-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4209-2815*
***К.Г. Нелаева*[1]**, *аспирант, мл. науч. сотр.; ResearcherID: GYJ-7223-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3283-4451*
[1]Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; er51@bk.ru, chernobrovkina50@bk.ru✉, borisraevsky@gmail.com, nelaevakg@krc.karelia.ru
[2]Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; 2003bk@bk.ru
[3]Мурманский государственный технический университет, ул. Спортивная, д. 13, г. Мурманск, Россия, 183010; 2003bk@bk.ru

Поступила в редакцию 11.06.23 / Одобрена после рецензирования 03.09.23 / Принята к печати 05.09.23

Аннотация. Качество лесных культур существенно зависит от характеристик посадочного материала. Для получения качественных сеянцев хвойных пород используется и оптимизируется процесс контейнерного выращивания, внедряется его двухротационый режим. Целью исследования было проведение сравнительного анализа 1-летних контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* L. по морфометрическим параметрам при двухротационном режиме выращивания в условиях короткого вегетационного периода в высоких широтах. Эксперимент проводили в лесном питомнике на юге Республики Карелии. Продолжительность для варианта 1-й ротации – 146 дней, 2-й – 91 день, для контрольного – 132 дня. Определяли параметры сеянцев: высоту, длины корня и почки, диаметр у корневой шейки, сухую массу всего сеянца, его надземной части, корня, хвои. Оценивали интегральные показатели качества: соотношение сухой массы надземной и подземной частей; коэффициент выносливости, равный отношению

© Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Раевский Б.В., Зайцева М.И., Нелаева К.Г., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

высоты сеянца к его диаметру у корневой шейки, а также индекс качества Диксона. Самые низкие массы сеянцев выявлены в варианте 2-й ротации. Разница средних коэффициентов выносливости и индексов качества Диксона между всеми вариантами была статистически значимой на уровне $p < 0,05$. Соотношение сухой массы надземной и подземной частей оказалось самым низким у сеянцев 1-й ротации. Высокие коэффициенты корреляции между массой сеянца и диаметром корневой шейки для всех вариантов подтверждают значимость последнего показателя. Результаты свидетельствуют о необходимости корректировки временного режима и использования дополнительных агроприемов для получения качественного посадочного материала.
Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., качество сеянцев, морфологические признаки, индекс качества, DQI, лесной питомник, двухротационное выращивание
Благодарности: Работа выполнена за счет средств федерального бюджета по госзаданию Карельского научного центра РАН (Институт леса Карельского научного центра РАН).

Для цитирования: Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Raevsky B.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Double-Cropping of *Pinus sylvestris* L. Containerized Seedlings under Short Growing Season Conditions at High Latitudes // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 50–65. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-50-65

Introduction

The quality of the created forest plantations, especially at an early growth stage, significantly depends on the planting stock characteristics [7, 10, 16–18, 20, 21, 31, 38, 43]. Along with increased growth energy, seedlings must have increased resistance to unfavorable environmental factors [41]. By using high-quality seedlings, it is possible to improve establishment and growth, as well as reduce planting density and thinning costs. The process of growing containerized planting stock is being actively implemented and optimized [5, 24, 34].

In the Republic of Karelia, containerized seedlings have been produced for more than three decades. To ensure successful seedling establishment in the field, understanding the impact of nursery practices on seedling quality is essential [29].

The modern practices of coniferous seedlings cultivation involve double-cropping containerized seedlings in a single year [9, 15]. First-rotation sowing is carried out with an increase in the duration of daylight, in the second rotation – with the maximum duration of daylight [15].

However, in Russian mid-boreal forest nurseries, multi-rotation cultivation poses challenges due to the short growing season and possible asynchrony of environmental factors (decrease in temperature and photoperiod duration) suppressing the shoot growth and triggering the process of apical bud formation, as well as the development of stress resistance [3, 8, 15, 27]. There is a risk that the seedlings will be unprepared for the stress of planting and winter conditions.

For Karelia, which is experiencing a shortage of coniferous seedlings for reforestation, the intensification of the cultivation process is an urgent issue. Before the widespread introduction of double-rotation cultivation, it is necessary to conduct production testing of this regime under conditions of a short growing season, obtain data on the morphometric parameters of seedlings and, based on an analysis of the results obtained, draw a conclusion on the possibility of introducing the tested regime or the need to adapt it to these conditions. It is important to identify which

indicators may not meet the standard ones in order to effectively look for ways to adapt the method. The most commonly used morphometric standards for seedling quality are dry mass and linear dimensions of the whole seedling and its organs [18, 21, 25, 35]. Integral indices are widely used to assess the quality of seedlings of woody plants of various species: sturdiness quotient (SQ), shoot:root dry mass ratio (SRR) and Dickson Quality Index (DQI) [2, 13].

The aim of this study has been to conduct a comparative analysis of one-year-old containerized seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) according to morphometric parameters under a double-cropping growing regime under conditions of a short growing season at high latitudes.

Research Objects and Methods

The Experiment Design. Double-cropping cultivation of one-year-old containerized seedlings *Pinus sylvestris* L. was carried out in a forest nursery (in the village of Vilga, southern Karelia, Russia, 61°82′N, 34°16′E) during the 2020 growing season. Scots pine seeds of quality class 1 (germination rate of at least 90 %) harvested in the Medvezhyegorsk central forestry (62°55′ N) have been used. The seedlings have been grown in Plantek 81F rigid plastic trays (81 cells per tray, 546 cells per m^{-2}, cell volume 85 cm^3, depth 10 cm). The containers have been filled with a substrate consisting of slightly decomposed high-moor sphagnum peat, dolomite meal and a complex fertilizer as the main additive. Two seeds have been sown in each cell. After germination, one plant per cell has been randomly retained and the rest have been removed. The seedlings have been grown in a greenhouse according to a standard protocol with foliar top-dressing with complex fertilizers and regular watering. The electrical conductivity of the substrate during cultivation has been maintained at the level of 1.5–1.8 mS/cm. Fungicides have been used to prevent mold infection.

In the variants of the first (1rot) and second (2rot) rotations, sowing was carried out on May 2 and June 26, respectively (Table 1). The control variant (0rot – no rotation within the season) was sown on May 16. Containers with the 1rot seedlings were moved from the greenhouse to the hardening plot on June 20. Containers with the 2rot seedlings were placed in the greenhouse on June 26. On August 25, they were transferred to the hardening plot (Table 1). The cultivation of 0rot seedlings in the greenhouse and in the hardening plot has been carried out according to a standard protocol [43].

Table 1

The experiment design for growing one-year-old containerized seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

EV	May	June	July	Aug	Sept	GS	Sum over season		
	GGD/OGD, days						TGD, days	TGD′, %	GGD′, %
1rot	30/0	20/10	0/31	0/31	0/24	50/96	146	111	34.25
2rot	0/0	5/0	31/0	25/6	0/24	61/30	91	69	67.03
0rot	16/0	30/0	31/0	25/6	0/24	102/30	132	100	77.27

Note: EV – experiment variants; GGD (numerator) – greenhouse growing duration; OGD (denominator) – open growing duration; GS – growing season; TGD – total growing duration; $TGD_i' = TGD_i/TGD_{0rot} \cdot 100$; $GGD_i' = GGD_i/TGD_i \cdot 100$; i – experiment variant.

The Morphometric Methods. On September 24, 30 seedlings have been randomly selected from each variant when froming a sample for morphometric measurements. A total of 90 Scots pine seedlings have been selected. Each seedling has been divided into stem, needles, bud and root. The root system of the seedlings was washed with tap water to remove all soil particles. The height from the root collar to the base of the terminal bud (SH, cm), root length (RL, cm), bud length (BL, mm) and root collar diameter (RCD, mm) have been measured in seedlings. The wet masses of seedling organs have been determined gravimetrically, the water content (%) in the organs has been determined, and the dry masses have been calculated for: the tree (TDM, g), the shoot (SDM, g), the root (RDM, g), the needles (NDM, g) and the buds (BDM, g). To quantify the quality of seedlings, the integral indicators are: SRR = = SDM/RDM, SQ = SH(cm)/RCD(mm) and DQI = TDM/(SH + SRR).

The Data Analysis. Morphometric parameters of one-year-old *Pinus sylvestris* L. containerized seedlings have been characterized by the mean ± standard deviation (SD), as well as minimum and maximum values depending on the growing regime variant: 1rot, 2rot or 0rot. The data has been analyzed using one-way ANOVA to indentify differences in the mean parameters between the three growing regimes. The Tukey test has been used for pair-wise comparisons (as a posteriori test) of growing regimes. All probabilities were tested at a significance level of 0.05. The variables have been tested for correlations using the Pearson correlation analysis. The Pearson correlation coefficients calculated for each pair of morphometric parameters are presented in correlation matrices according to the experiment variants. Paired linear regression analysis has been used to examine the relationship between variables. A higher coefficient of determination (R^2) has been used to select the best regression models. To study the relationship between the morphometric parameters of the seedlings and the time mode of the growing regime, normalized values of the total growing duration (TGD′) and the greenhouse growing duration (GGD′) have been used (Table 1).

The variables have been tested for correlation with the morphometric parameters of the seedlings. To study the dependence of the morphometric parameters of seedlings on the time mode of the growing regime, multiple regression models have been constructed with two explanatory variables of the form: $y_i = \alpha + \beta \cdot TGD_i' + + \beta \cdot GGD_i' + \varepsilon$.

Results and Discussion

The Morphometric Parameters of the Seedlings. The SH in the control (0rot) variant has been significantly higher than that in the 1rot and 2rot variants (Table 2). The SH did not differ significantly between the 1rot and 2rot ($\alpha = 0.05$), amounting to 64 and 72 % of the control, respectively.

The RCD has been significantly smaller in the 2rot variant compared to that in the 1rot one.

The masses of both the whole seedling and its individual organs have been significantly lower at the 2rot variant compared to the 1rot and 0rot ones ($\alpha = 0.05$). The mass of seedlings and their individual organs, with the exception of the RDM, has had similar values in the 1rot and 0rot variants.

Table 2

The morphometric parameters of one-year-old *Pinus sylvestris* L. containerized seedlings (mean ± SD; minimum and maximum values) according to the experiment variants

EV	Value	TDM, g	SDM, g	NDM, g	RDM, g	SH, cm	RCD, mm	BL, mm	RL, cm
1rot	Mean	1.05a	0.54a	0.43a	0.51a	6.3a	1.94a	6.70a	139a
	±SD	0.08	0.05	0.05	0.04	0.6	0.08	0.50	11
	Min	0.75	0.33	1.60	0.01	4.0	0.25	0.33	100
	Max	1.54	0.83	2.40	0.06	9.0	0.71	0.77	200
2rot	Mean	0.62b	0.39b	0.31b	0.23b	7.3a	1.70b	4.50b	188b
	±SD	0.05	0.03	0.03	0.02	0.5	0.07	0.40	17
	Min	0.42	0.23	1.40	0.01	5.3	0.17	0.13	110
	Max	0.83	0.55	2.10	0.01	9.2	0.44	0.35	290
0rot	Mean	0.91a	0.57a	0.43a	0.34c	10.4b	1.82ab	5.50c	139a
	±SD	0.16	0.10	0.08	0.07	1.1	0.21	0.70	19
	Min	0.44	0.24	1.20	0.01	3.0	0.14	0.16	95
	Max	1.67	1.07	2.60	0.02	7.0	0.76	0.60	245
F-value*		27.31	11.49	10.22	57.57	39.77	5.03	22.51	15.42
p-level		0.000	0.00004	0.0001	0.0000	0.0000	0.009	0.0000	0.0000

Note: Here and in Table 4 different letters indicate a significant difference between the variants as assessed using the Tukey test ($\alpha = 0.05$); $df = 77$.

The Pearson linear correlation analysis has been used between all the observed variables (Table 3).

Table 3

The Pearson correlation coefficients between the morphometric parameters of one-year-old *Pinus sylvestris* L. containerized seedlings according to the experiment variants ($p \leq 0.05$)

	TDM	SDM	SH	RCD	BDM	BL	NDM	RDM
1rot								
SDM	0.894	1.000						
SH	0.010	0.182	1.000					
RCD	0.719	0.659	0.196	1.000				
BDM	–0.002	0.073	0.042	–0.090	1.000			
BL	–0.370	–0.303	–0.011	–0.075	0.056	1.000		
NDM	0.842	0.968	0.150	0.540	–0.022	–0.366	1.000	
RDM	0.791	0.433	–0.229	0.547	–0.103	–0,332	0.371	1.000
RL	0.172	0.081	–0.029	0.091	–0.073	–0.156	0.036	0.235
2rot								
SDM	0.937	1.000						
SH	0.226	0.299	1.000					
RCD	0.552	0.562	0.298	1.000				

The end of Table 3

	TDM	SDM	SH	RCD	BDM	BL	NDM	RDM
BDM	–0.245	–0.153	0.103	–0.121	1.000			
BL	–0.240	–0.177	–0.067	0.009	0.153	1.000		
NDM	0.911	0.973	0.148	0.535	–0.155	–0.115	1.000	
RDM	0.825	0.574	0.046	0.383	–0.326	–0.274	0.557	1.000
RL	–0.100	–0.123	–0.146	–0.043	–0.233	–0.116	–0.116	–0.034
0rot								
SDM	0.977	1.000						
SH	0.618	0.554	1.000					
RCD	0.874	0.827	0.800	1.000				
BDM	0.039	–0.030	0.374	0.144	1.000			
BL	0.498	0.469	0.882	0.798	0.232	1.000		
NDM	0.928	0.963	0.357	0.696	–0.112	0.284	1.000	
RDM	0.941	0.846	0.660	0.865	0.145	0.497	0.783	1.000
RL	0.135	0.056	0.439	0.187	0.266	0.275	–0.006	0.249

Note: Here and in Table 5 the significance of the correlation between the parameters measured is indicated by the intensity of the coloring.

A strong correlation has been found between the following indicators: the TDM, SDM, NDM and the RCD. No significant correlation between the bud dry mass and the RL with other parameters has been found in all the experiment variants. The correlation coefficients between the variables in the 1rot and 2rot variants have been lower than in the 0rot variant.

The Integral Quality Indices. For all analyzed variants, the difference in the average SQ values has been statistically significant at the level of $p < 0.05$ and has amounted to 57 and 72 % of the control for the 1rot and 2rot variants, respectively (Table 4).

Table 4

The integral quality indices SQ, SRR, DQI of one-year-old *Pinus sylvestris* L. containerized seedlings (mean ± SD) according to the experiment variants

Value	SQ			SRR			DQI		
	1rot	2rot	0rot	1rot	2rot	0rot	1rot	2rot	0rot
Mean	3.3a	4.2b	5,8c	1.1a	1.7b	1.7b	0.23a	0.10b	0.12c
±SD	86	1	0.9	0.3	0.3	0.3	0.06	0.02	0.05
F-value*	46.67			33.07			62.5		

Note: *df* = 77.

The SRR of the 1rot seedlings has been more than one and a half times lower than that of the seedlings of the other two variants. The SRR values have been equal in the 2rot and 0rot variants. The DQI values for all variants have had significant differences and ranged from 0.10 to 0.23.

A high correlation has been found between DQI and the following variables: the TDM, SDM, NDM and RCD, and a significant correlation with the SH in the 0rot variant (Table 5).

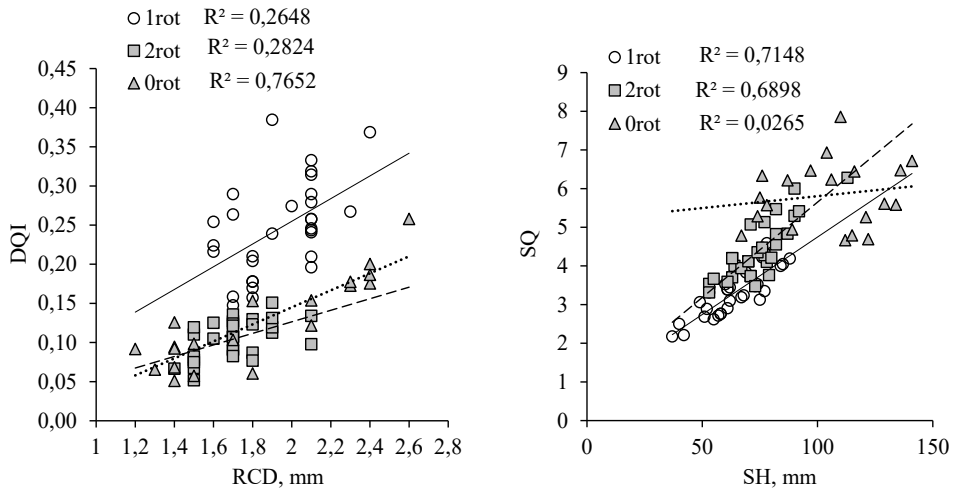
Table 5

The Pearson correlation coefficients between the integral quality indices SQ, SRR, DQI and the morphometric parameters of one-year-old *Pinus sylvestris* L. containerized seedlings according to the experiment variants

	SQ			SRR			DQI		
	1rot	2rot	0rot	1rot	2rot	0rot	1rot	2rot	0rot
TDM	–0.287	–0.124	–0.507	0.279	0.031	–0.065	0.748	0.829	0.974
SDM	–0.109	–0.054	–0.514	0.671	0.366	0.137	0.484	0.670	0.938
SH	0.893	0.831	0.163	0.403	0.284	–0.207	–0.586	–0.266	0.517
RCD	–0.251	–0.276	–0.447	0.235	0.150	–0.146	0.505	0.531	0.875
BDM	0.071	0.186	0.240	0.146	0.174	–0.307	–0.094	–0.330	–0.015
BL	–0.008	–0.049	0.012	–0.059	0.103	–0.053	–0.274	–0.140	0.452
NDM	–0.084	–0.191	–0.586	0.686	0.353	0.158	0.443	0.724	0.903
RDM	–0.429	–0.203	–0.446	–0.356	–0.518	–0.377	0.843	0.855	0.938
RL	–0.043	–0.117	0.309	–0.065	0.070	–0.521	0.197	–0.017	0.063

In the 1rot and 2rot experiment variants, a significant correlation has been found between the DQI values only with the following variables: the TDM, SDM, NDM and the RCD. There has been no correlation between DQI and the SH in these variants.

The regression analysis has shown that the DQI value has been significantly and positively correlated with the RCD only in the 0rot variant ($R^2 = 0.77$; see Fig. below).



Paired linear regression analysis of the ratios of integral quality indicators DQI and SQ and morphometric variables (linear dimensions) of one-year-old containerized *Pinus sylvestris* L. seedlings according to the experiment variants

The Relationship between the Morphometric Parameters of the Seedlings and Temporal Indicators of the Growing Regime. The dependence of the morphometric parameters of the seedlings on the normalized temporal indicators of the growing regime TGD′ and GGD′ has been studied.

The TDM, SDM, NDM, RDM, RCD, BL and the integral quality index DQI have positively correlated with the total growing duration (TGD′). A strong positive correlation with TGD′ has been observed for the TDM and RDM, as well as DQI (Table 6).

Table 6

The Pearson correlation coefficients between the morphometric parameters of one-year-old containerized *Pinus sylvestris* L. seedlings and the normalized temporal indicators of the growing regime TGD′ and GGD′, ($p<0.05$)

	TDM	SDM	NDM	RDM	SH	RCD	BL	QS	SRR	DQI
TGD′	0.643	0.450	0.447	0.730	–0.097	0.330	0.579	–0.260	–0.517	0.680
GGD′	–0.422	–0.141	–0.190	–0.646	0.645	–0.264	–0.496	0.785	0.664	–0.770

The SH, as well as the QS and SRR indicators have positively correlated with the duration of the seedlings' stay in the greenhouse (GGD′). The RDM and DQI have shown a strong negative relationship with GGD′. The TDM, BL and RCD have shown a moderate negative relationship with GGD′.

To study the dependence of the morphometric characteristics of seedlings on the normalized total growing duration and the greenhouse growing, multiple regression models have been constructed (Table 7).

Table 7

The parameters of the multiple regression models with two explanatory variables of the form: $y_i = \alpha + \beta_1 * TGD'_i + \beta_2 * GGD'_i + \varepsilon$, y – the morphometric parameters of one-year-old containerized *Pinus sylvestris* L. seedlings

y	α			β_1			β_2			R^2	F
	Coef	t-stat	p-value	Coef	t-stat	p-value	Coef	t-stat	p-value		
TDM	17.80	0.076	0.940	9.590	5.589	0.000	–0.840	–0.483	0.630	0.415	27.31
RDM	110.5	1.080	0.284	4.434	5.911	0.000	–2.723	–3.574	0.001	0.599	57.57
SH	–44.63	–2.613	0.011	0.600	4.794	0.000	1.223	9.620	0.000	0.550	47.07
QS	–1.839	–2.352	0.021	0.024	4.203	0.000	0.072	12.36	0.000	0.688	84.80
SRR	1.111	3.292	0.002	–0.004	–1.743	0.085	0.013	5.282	0.000	0.462	33.06
DQI	0.167	3.354	0.001	0.001	4.098	0.000	–0.003	–6.845	0.000	0.666	76.67

The proportion of variance due to regression in the total variance of the "y" indicator, characterized by the determination coefficient R^2, exceeded 50 % ($R^2 > 0.5$) in the RDM, QS and DQI models, which allows them to be considered significant (for $\alpha < 0.05$).

The Morphometric Parameters of the Seedlings. The morphometric parameters of the seedlings and their organs at the end of the growing season have reflected the growth activity depending on the conditions and duration of cultivation. Many studies show that the seedling RCD, the shoot height, and the SRR strongly correlate with the establishment rate during planting [10, 20].

A comparative analysis of the seedlings in our experiment has revealed significant differences in the linear dimensions and biomass of plants depending on the rotation regime. In terms of height, the seedlings of the 1rot and 2rot variants have been significantly inferior to the 0rot (control) variant, amounting to 64 and 72 %, respectively. The RCD has been significantly lower in the 2rot variant compared to the 1rot one, but has not differed significantly from the 0rot one. In terms of bud length, the 2rot seedlings have also had the lowest value (83 % of the 0rot variant); the leader has been the 1rot variant (123 % of the 0rot variant). In terms of the mass of both the whole seedling and individual organs, the worst results have been obtained in the 2rot variant. There have been no significant differences in the TDM, SDM and NDM between the 1rot and 0rot variants. The RDM in the 1rot variant has been 1.5 times higher than in the 0rot variant, and more than twice as high as in the 2rot variant.

Allometric models can be useful in practice for estimating the seedling mass based on available linear dimension data. Models have been developed to predict seedling biomass, including total biomass, aboveground and underground biomass of tropical woody plant seedlings based on the RCD, SH, and wood density [37]. Understanding the existing correlations between morphometric parameters is necessary to build similar models that will help develop better production methods and ensure high quality seedlings [4].

The Pearson linear correlation analysis has been performed between all the observed variables. There has been no significant correlation between the bud dry mass and the RL with other indicators in all experiment variants, so they have been excluded from further consideration. The bud length has shown an ambiguous correlation with other indicators between the experiment variants. Thus, in the 1rot and 2rot variants, its correlation with most indicators is weak negative, and in the 0rot variant it is strong or moderately positive.

Of greatest interest has been the identification of a correlation between the linear dimensions of the above-ground part, which can be determined without damaging the plant, and the values of the dry mass of the organs of the whole seedling. The SH has shown a moderate positive relationship with the biomass indices only in the 0rot variant. The RCD, on the contrary, has shown a high and medium positive correlation with the parameters of both the above-ground and underground parts of the seedlings in all variants, with the exception of a weak negative correlation with the RDM in the 1rot variant. The 1rot and 2rot variants generally have lower correlation coefficients between the variables.

The Integral Seedling Quality Indices. Morphometric parameters used to assess the quality of seedlings should be studied comprehensively rather than individually. If considered separately, there is a risk of selecting taller and weaker seedlings and rejecting smaller and stronger ones that may have better establishment rates. In order to minimize possible errors that may arise when using only one or two parameters, the work has used integral seedling quality indices based on two or more of the most significant morphometric parameters [1, 13, 14, 32, 35, 40].

Many studies show that the seedling RCD, shoot height, SRR and other integral indices strongly correlate with establishment and growth rates upon planting [10, 20]. The integral indices (SRR, SQ, and DQI) have been evaluated in this study for three growing regimes. The best results for all three integral indices have been obtained in the 1rot variant.

The SRR is considered an effective and reliable indicator for assessing the quality of seedlings [4]. The seedlings with a very high SSR indicate a disproportionate development of the above- and underground parts of the seedlings, which leads to uneven water distribution in the plant and its poor establishment. Their initial growth is inhibited after planting in the field [6, 36].

The low ratio of the dry mass of the above-ground part of the seedling to the dry mass of the root (SSR) has been shown to be particularly important for establishment upon planting under soil moisture deficiency conditions [20]. This can be explained by the increased water and nutrient consumption provided by the larger root system compared to the lower requirements of a smaller above-ground part. On the other hand, a very low SSR may indicate insufficient shoot growth [28, 38]. The SSR ratio varies depending on the plant species and age. In coniferous seedlings, this ratio usually exceeds 1. The recommended SRR for many conifers grown in nurseries is within 2.5 [26].

The lowest SRR value in our experiment has been obtained in the 1rot variant. In the seedlings of the 2rot and 0rot variants, the values of this ratio have not differed significantly, but have been noticeably higher than in the seedlings of the 1rot variant. Our results show that the 1rot seedlings, characterized by a low ratio of aboveground mass to root mass due to a more developed root system, have a higher chance of establishing when transplanted to a forest cultivation area. The RCD of the stem at the seedling stage can help predict future growth quality after transplantation, but only in combination with SH does it provide information on whether the seedlings are highly vigorous, vigorous or weak [10, 22, 28].

SQ is an important morphometric indicator of seedling quality [11, 12, 26, 28]. In our experiment, the lowest SQ value has been obtained in the 1rot variant and amounted to 57 % of the 0rot variant. A lower SQ indicates a stronger and higher quality plant. The SQ can be used to assess the survival and growth of seedlings [28]. In the 2rot variant, the SQ has also been lower than in the 0rot one (72 % of the 0rot variant).

DQI takes into account several variables and can therefore provide important information about the overall quality of seedlings [25, 28, 39]. It includes five morphometric parameters (the TDM, SDM, RDM, SH and RCD) and serves as an effective indicator of quality and is often used in seedling research. A higher DQI value indicates a more desirable phenotype, stability and balance of biomass distribution in seedlings [28]. The DQI values for all experiment variants had significant differences. The best DQI value has been found in the 1rot variant; it has been two or more times higher than in the 2rot and 0rot variants.

The Regression Models of the Relationship between Seedling Quality Coefficients and Morphometric Indicators. For the construction of regression models, suitable variables have been identified using correlation analysis. For Dixon quality index, a high positive correlation has been found with the following variables: TDM, SDM, NDM, RDM, RCD, and a significant one with the SH in the 0rot variant; a high positive correlation with the TDM and RDM in the 1rot and 2rot experiment variants. No correlation has been found between DQI and the SH.

The high correlation of morphometric parameters and the calculated DQI in the 0rot variant has indicated a good balance of the seedling organs in terms of mass and linear dimensions in this experiment variant.

Regression models have been constructed to identify the relationship between the DQI and SQ quality indices and some morphometric parameters. A statistically significant dependence of DQI on the TDM ($0.95 \geq R^2 \geq 0.58$) and RDM ($0.88 \geq R^2 \geq 0.61$) has been shown in all experiment variants. The relationship between DQI and RCD has been found only in the 0rot variant ($R^2 = 0.77$). A strong positive relationship between the SQ and SH has been obtained in the 1rot ($R^2 = 0.71$) and 2rot ($R^2 = 0.67$) variants.

Since the coefficients used here, primarily DQI, are considered good indicators of seedling quality, allowing to predict field survival and further growth, as shown by many studies [4, 10, 20], the absence of a strong or moderate correlation between the linear dimensions of the shoot and these quality indices obviously does not allow to use only non-damaging methods for a reliable assessment of seedling quality. To obtain a more reliable assessment, it is also desirable to determine the biomass of organs, as well as their physiological parameters.

The Morphometric Parameters of the Seedlings Depending on the Temporal Growing Regime. Quantitative indicators of the biomass of a seedling and its organs at the end of the growing season characterize growth activity and depend on the conditions or duration of their cultivation. A comparative analysis of the morphometric parameters of seedlings and their organs, carried out in this experiment, has made it possible to reveal differences depending on both the total duration of cultivation during the season and the duration of cultivation under different conditions: in a greenhouse or in open ground.

The dependence of the morphometric parameters of seedlings on the normalized temporal indicators of the growing regime TGD′ and GGD′ has been studied. Some linear dimensions and dry mass of the seedling and its individual organs, as well as the DQI integral quality index, have positively correlated with TGD′. In particular, the TDM, RDM and DQI have strongly positively correlated with TGD′ ($R = 0.643$, 0.730 and 0.680, respectively). A strong positive correlation has been observed for the SH, QS and SRR with GGD′ ($R = 0.645$, 0.785 and 0.664, respectively). A strong negative relationship has been found between the RDM and DQI with GGD′ and a moderate negative one between the TDM, BL and RCD with GGD′.

Multiple regression models of the form: $y_i = \alpha + \beta_1 \cdot TGD_i' + \beta \cdot GGD_i' + \varepsilon$, with two explanatory variables have been constructed to study the dependence of the morphometric parameters of seedlings on TGD′ and GGD′. The significance of the models for the RDM, SH, QS and DQI indices (for $\alpha < 0.05$) has been shown, since the proportion of variance due to the total variance of the four studied indicators, characterized by the determination coefficient R^2, has exceeded 50 % ($R^2 > 0.5$).

The analysis of multiple regression models has shown that 60 % of the variations in root mass, 55 % of the variations in SH, 69 % of the variation in QS and 67 % of the variations in DQI have been explained by TGD′ and GGD′. The regression model for the root mass indicates a positive relationship with TGD′ and a negative relationship with GGD′. That is, the long stay of seedlings in the greenhouse significantly negatively correlates with the mass of the roots. The SH, on the contrary, has depended positively on both GGD′ and TGD′, and to a greater extent on GGD′.

DQI has depended positively on the TGD′ and negatively on the GGD′. The results obtained show that in order to obtain high-quality planting stock with a high DQI quality coefficient, a relative stay in the greenhouse in all experiment variants is sufficient, however, the total duration of cultivation in the 2rot variant should be increased.

The morphometric parameters of planting stock must be taken into account when choosing the soil conditions of the site planned for planting. When planted in damp areas characterized by well-developed surrounding herbaceous vegetation, seedlings with a tall and massive above-ground part, with a large photosynthetic surface area, have an advantage in a fierce competition for light. They can be recommended for creating forest plantations in such areas. In our experiment, seedlings of the 0rot variant, having the greatest SH, but the worst SRR indicators, are better suited to damp areas with conditions favorable for their growth.

On the contrary, the seedlings of smaller size, but having a small transpiring surface area relative to the absorbing root system, with low SRR values, are more easily established in areas exposed to water stress [17, 26]. The 1rot seedlings with the lowest SRR value are better suited for dry areas with poor vegetation.

When choosing the edaphic conditions for a planting site, it is necessary to take into account the morphometric parameters of seedlings grown under different growing regimes in order to maximize their post-planting survival and further growth. Periods of spring drought may become more frequent due to global warming, which must be taken into account when improving methods for growing planting stock adapted to conditions of water deficiency [30]. The selection of seedlings with the desired genetic, morphometric and physiological parameters is necessary to maximize the use of site resources [16, 23, 30, 33]. The phenotypic characteristics formed during the cultivation of seedlings in forest nurseries ensure their preliminary adaptation to the planting site.

Conclusions

A production test of the double-rotation cultivation of one-year-old *Pinus sylvestris* L. containerized seedlings has been conducted in a forest nursery under conditions of a short growing season at high latitudes. The morphometric characteristics of seedlings have been obtained and analyzed, and the possibility of introducing the tested regime into forest nursery practice without adaptation to these climatic conditions has been assessed.

The absence of a significant correlation between the linear dimensions of the above-ground part and DQI and other integral indices in two experiment variants indicates the insufficiency of non-damaging assessment methods for obtaining objective information on the quality of seedlings. For a more accurate assessment, it is advisable to determine the mass of seedling organs and physiological parameters.

A comparative assessment of the of the morphometric parameters of pine seedlings of three cultivation variants, including the use of integral quality indices, has shown that in order to obtain high-quality standard planting stock in northern latitudes, it is necessary to adapt the double-rotation cultivation regime by adjusting the time regime and applying additional agricultural techniques.

REFERENCES

1. Banach J., Kormanek M., Jaźwiński J. Quality of Scots Pine, European Beech and Pedunculate Oak Grown from Sowing on Soil with Different Compaction Levels. *Leśne Prace Badawcze* = Forest Research Papers, 2020, vol. 81, no. 4, pp. 167–174. https://doi.org/10.2478/frp-2020-0020

2. Bayala J., Dianda M., Wilson J., Ouédraogo S.J., Sanon K. Predicting Field Performance of Five Irrigated Tree Species Using Seedling Quality Assessment in Burkina Faso, West Africa. *New Forests*, 2009, vol. 38, pp. 309–322. https://doi.org/10.1007/s11056-009-9149-4

3. Beck E.H., Heim R., Hansen J. Plant Resistance to Cold Stress: Mechanisms and Environmental Signals Triggering Frost Hardening and Dehardening. *Journal of Biosciences*, 2004, vol. 29, pp. 449–459. https://doi.org/10.1007/BF02712118

4. Binotto A.F., Lúcio A.D.C., Lopes S.J. Correlations Between Growth Variables and the Dickison Quality Index in Forest Seedlings. *Cerne*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 457–464. https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000400005

5. Bobushkina S.V. Efficiency Production Methods of Conifers Ball-Rooted Planting Stock in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.). https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-45-54

6. Bumgarner M.L., Salifu K.F., Jacobs D.F. Subirrigation of *Quercus rubra* seedlings: Nursery Stock Quality, Media Chemistry, and Early Field Performance. *HortScience*, 2008, vol. 43, iss. 7, pp. 2179–2185. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.2179

7. Cain M.D., Barnett J.P. An 8-Year Field Comparison of Naturally Seeded to Planted Container *Pinus taeda*, with and without Release. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, vol. 26, no. 7, pp. 1237–1247. https://doi.org/10.1139/x26-138

8. Chang C.Y., Fréchette E., Unda F., Mansfield S.D., Ensminger I. Elevated Temperature and CO_2 Stimulate Late-Season Photosynthesis but Impair Cold Hardening in Pine. *Plant Physiology*, 2016, vol. 172, iss. 2, pp. 802–818. https://doi.org/10.1104/pp.16.00753

9. Colombo S.J. Frost Hardening Spruce Container Stock for Overwintering in Ontario. *New Forests*, 1997, vol. 13, pp. 449–467. https://doi.org/10.1023/A:1006571300025

10. Davis A.S., Jacobs D.F. Quantifying Root System Quality of Nursery Seedlings and Relationship to Outplanting Performance. *New Forests*, 2005, vol. 30, pp. 295–311. https://doi.org/10.1007/s11056-005-7480-y

11. De La Fuente L.M., Ovalle J.F., Arellano E.C., Ginocchio R. Use of Alternative Containers for Promoting Deep Rooting of Native Forest Species Used for Dryland Restoration: the Case of *Acacia caven*. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2017, vol. 10, pp. 776–782. https://doi.org/10.3832/ifor2101-010

12. Devetaković J.R., Pavlović S., Krinulović L., Kerkez Janković I. Field Performance of Austrian Pine Bareroot Seedlings in Comparision to Seedlings Pattern and Density in the Nursery. *Reforesta*, 2021, no. 11, pp. 27–35. https://doi.org/10.21750/REFOR.11.03.91

13. Dickson A., Leaf A.L., Hosner J.F. Quality Appraisal of White Spruce and White Pine Seedling Stock in Nurseries. *The Forestry Chronicle*, 1960, vol. 36, no. 1, pp. 10–13. https://doi.org/10.5558/tfc36010-1

14. Dushimimana C., Magomere T., Mulatya J., Vandenabeele J., Olubayo F., Smagghe G., Werbrouck S.P.O. Variation of Morphological Traits and Quality Indices of Micropropagated *Melia volkensii* Gürke Clones before Field Planting. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 2, art. no. 337. https://doi.org/10.3390/f13020337

15. Fedotov A.N., Zhigunov A.V. Tge Effect of the Day Length on the Formation of Apical Buds in One-Year-Old Containerized Seedlings of Scots Pine and European Spruce. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2016, iss. 215, pp. 69–80. (In Russ.).

16. Grossnickle S.C., MacDonald J.E. Why Seedlings Grow: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 2018, vol. 49, pp. 1–34. https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4

17. Grossnickle S.C. Why Seedlings Survive: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 711–738. https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6

18. Haase D.L., Davis A.S. Developing and Supporting Quality Nursery Facilities and Staff are Necessary to Meet Global Forest and Landscape Restoration Needs. *Reforestation*, 2017, no. 4, pp. 69–93. https://doi.org/10.21750/REFOR.4.06.45

19. Haase D.L. Understanding Forest Seedling Quality: Measurements and Interpretation. *Tree Planters' Notes*, 2008, vol. 52, iss. 2, pp. 24–30.

20. Hubbel K.L., Ross-Davis A.L., Pinto J.R., Burney O.T., Davis A.S. Toward Sustainable Cultivation of *Pinus occidentalis* Swartz in Haiti: Effects of Alternative Growing Media and Containers on Seedling Growth and Foliar Chemistry. *Forests*, 2018, vol. 9, no. 7, art. no. 422. https://doi.org/10.3390/f9070422

21. Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. Forecasting the Field Performance of Austrian Pine Seedlings Using Morphological Attributes. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2016, vol. 10, pp. 99–107. https://doi.org/10.3832/ifor1722-009

22. Jacobs D.F., Salifu K.F., Seifert J.R. Relative Contribution of Initial Root and Shoot Morphology in Predicting Field Performance of Hardwood Seedlings. *New Forests*, 2005, vol. 30, pp. 235–251. https://doi.org/10.1007/s11056-005-5419-y

23. Johansson K., Ring E., Högbom L. Effects of Pre-Harvest Fertilization and Subsequent Soil Scarification on the Growth of Planted *Pinus sylvestris* Seedlings and Ground Vegetation after Clear-Felling. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 4, art. no. 1016. https://doi.org/10.14214/sf.1016

24. Kolevska D.D., Dimitrova A., Cokoski K., Basova M. Growth and Quality of *Pinus nigra* (Am.), *Pinus sylvestris* (L.) and *Pinus pinaster* (Aiton) Seedlings in Two Container Types. *Reforesta*, 2020, iss. 9, pp. 21–36. https://dx.doi.org/10.21750/REFOR.9.04.78

25. Köster E., Pumpanen J., Palviainen M., Zhou X., Köster K. Effect of Biochar Amendment on the Properties of Growing Media and Growth of Containerized Norway Spruce, Scots Pine, and Silver Birch Seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 2021, vol. 51, no. 1, pp. 31–40. https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0399

26. Landis T.D., Dumroese R.K., Haase D.L. *The Container Tree Nursery Manual. Volume 7: Seedling Processing, Storage, and Outplanting*. Washington, DC, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Agriculture Handbook 674, 2010. 200 p.

27. Levkoev E., Mehtätalo L., Luostarinen K., Pulkkinen P., Zhigunov A., Peltola H. Development of Height Growth and Frost Hardiness for One-Year-Old Norway Spruce Seedlings in Greenhouse Conditions in Response to Elevated Temperature and Atmospheric CO_2 Concentration. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 3, art. no. 9980. https://doi.org/10.14214/sf.9980

28. Lin K.-H., Wu C.-W., Chang Y.-S. Applying Dickson Quality Index, Chlorophyll Fluorescence, and Leaf Area Index for Assessing Plant Quality of *Pentas lanceolata*. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2018, vol. 47, no. 1, pp. 169–176. https://doi.org/10.15835/nbha47111312

29. Luis V.C., Peters J., González-Rodríguez A., Jimenez M., Morales D. Testing Nursery Plant Quality of Canary Island Pine Seedlings Grown under Different Cultivation Methods. *Phyton, Annales Rei Botanicae*, 2004, vol. 44, no. 2, pp. 231–244.

30. Luoranen J., Pikkarainen L., Poteri M., Peltola H., Riikonen J. Duration Limits on Field Storage in Closed Cardboard Boxes before Planting of Norway Spruce and Scots Pine Container Seedlings in Different Planting Seasons. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 12, art. no. 1126. https://doi.org/10.3390/f10121126

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

32. Olivo V.B., Buduba C.G. Influencia de Seis Sustratos en el Crecimiento de *Pinus ponderosa* Producido en Contenedores bajo Condiciones de Invernáculo = Influence of Six Substrates in *Pinus ponderosa* Grown in Containers under Greenhouse Conditions. *Bosque*, 2006, vol. 27, no. 3, pp. 267–271. (In Span.). https://doi.org/10.4067/S0717-92002006000300007

33. Örlander G., Gemmel P., Hunt J. Site Preparation: A Swedish Overview. *FRDA Report* (*Victoria, B.C.*), 1990, no. 105, 62 p.

34. Pinto J.R., Dumroese R.K., Davis A.S., Landis T.D. Conducting Seedling Stock-type Trials: A New Approach to an Old Question. *Journal of Forestry*, 2011, vol. 109, iss. 5, pp. 293–299. https://doi.org/10.1093/jof/109.5.293

35. Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Egorova A.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Morphometric Criteria for Assessing the Containerized Conifers Seedlings Quality. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 42–57. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-42-57

36. Shi W., Grossnickle S.C., Li G., Su S., Liu Y. Fertilization and Irrigation Regimes Influence on Seedling Attributes and Field Performance of *Pinus tabuliformis* Carr. *Forestry*, 2019, vol. 92, iss. 1, pp. 97–107. https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035

37. Thippawan S., Chowtiwuttakorn K., Pongpattananurak N., Kraichak E. Allometric Models to Estimate the Biomass of Tree Seedlings from Dry Evergreen Forest in Thailand. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 4, art. no. 725. https://doi.org/10.3390/f14040725

38. Thompson B.E. Seedling Morphological Evaluation – What You Can Tell by Looking. *Proceedings of Workshop on Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests*. Corvallis, OR Oregon State University, Forest Research Laboratory, 1985, pp. 59–71.

39. Tsakaldimi M., Ganatsas P., Jacobs D.F. Prediction of Planted Seedling Survival of Five Mediterranean Species Based on Initial Seedling Morphology. *New Forests*, 2013, vol. 44, pp. 327–339. https://doi.org/10.1007/s11056-012-9339-3

40. Vieira L.M., Gomes E.N., Brown T.A., Constantino V., Zanette F. Growth and Quality of Brazilian Pine Tree Seedlings as Affected by Container Type and Volume. *Ornamental Horticulture*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 276–286. https://doi.org/10.1590/2447-536x.v25i3.2059

41. Zhigunov A.V., Danilov D.A., Neverovsky V.Yu., Enders O.O. Planting Stock for the Creation of Tree Plantations on Post-Agrogenic Lands. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa*, 2016, no. 44, pp. 96–100. (In Russ.).

42. Zhigunov A.V., Mochalov B.A., Sokolov A.I., Saksa T., Sved J., Nerg J. *Fundamentals of Container Tree Seedling Production*. St. Petersburg, Suonenjoki: St. Petersburg Forestry Research Institute, METLA, 2011. 28 p. (In Russ.).

43. Zhigunov A.V. *Theory and Practice of Growing Containerized Seedlings*. St. Petersburg, 2000. 293 p. (In Russ.).

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

---

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 630*182.21
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-66-77

Концептуальная модель интродукции дендрофлоры в северных широтах Русской равнины

Н.А. Бабич*[1], *д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: G-7384-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7463-2519*
Е.Б. Карбасникова*[2], *д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: AAH-6250-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2850-9362*
О.С. Залывская*[1], *д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: AAY-4901-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7520-6295*
Ю.В. Александрова*[1]✉, *канд. с.-х. наук; *ResearcherID: AAH-4016-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2802-1124*
Н.П. Гаевский*[1], *канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: AAK-5430-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9511-004X*
И.А. Попкова*[1], *канд. с.-х. наук; *ResearcherID: AAE-1329-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8180-5673*
[1]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.babich@narfu.ru, o.zalyvskaya@narfu.ru, yu.aleksandrova@narfu.ru✉, n.gaevsky@narfu.ru, i.olupkina@narfu.ru
[2]Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; helen15@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.01.23 / Одобрена после рецензирования 18.04.23 / Принята к печати 20.04.23

Аннотация. Возрастание социально-эстетического значения городских зеленых насаждений, особенно при формировании жесткой урбанизированной среды обитания человека, инициирует развитие теоретических основ ступенчатой интродукции в северном направлении. Цель исследования – обобщение региональных особенностей интродукции видов дендрофлоры в условиях Европейского Севера России. Методологической базой послужили труды специалистов в области лесной интродукции, в т. ч. интродукторов-северян Ф.Б. Орлова, П.М. Малаховца, В.Н. Нилова, Н.А. Демидовой, О.С. Залывской, Е.Б. Карбасниковой и др. Результаты исследования имеют как теоретическое, так и практическое значение и являются составной частью общей теории ступенчатой интродукции в северном направлении. В процессе многолетних исследований и обобщения опыта стихийной интродукции сформирована и получила развитие оригинальная рабочая гипотеза ступенчатой интродукции древесных растений в северных природно-климатических условиях: для городской среды общепризнано наличие особого микроклимата (острова тепла), этого микроклиматиматического ресурса достаточно для успешной натурализации некоторых видов дендрофлоры несмотря на интродукционный стресс. Кратко описаны результаты работы старейших интродукционных центров на Европейском Севере. Представлены алгоритм и региональная стратегия развития исследований интродукционного процесса видов дендрофлоры в условиях Севера. Предложена концептуальная схема интродукционного

© Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П., Попкова И.А., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

испытания видов дендрофлоры в северных широтах Русской равнины. Выделены 4 стадии акклиматизации и 3 этапа натурализации. Разработан ряд шкал, вносящих вклад в совершенствование и оптимизацию интродукционных испытаний, оценку санитарно-гигиенических и социальных функций, выполняемых интродуцированными видами дендрофлоры. Богатство видового разнообразия новых для северных условий растений городской дендрофлоры является хорошей селекционной базой для дальнейших интродукционных испытаний и научной основой прогноза успешности ступенчатой интродукции многих ценных древесных и кустарниковых видов в северные широты.

Ключевые слова: ступенчатая интродукция, интродукционные испытания, дендрофлора, модель интродукции, Европейский Север, интродукция в северных широтах, урбанизированная среда

Для цитирования: Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П., Попкова И.А. Концептуальная модель интродукции дендрофлоры в северных широтах Русской равнины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 66–77. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-66-77

Original article

The Conceptual Model of Dendroflora Introduction in the Northern Latitudes of the Russian Plain

Nikolay A. Babich[1], *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: G-7384-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7463-2519*
Elena B. Karbasnikova[2], *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAH-6250-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2850-9362*
Olga S. Zalyvskaya[1], *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAY-4901-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7520-6295*
Yulia V. Aleksandrova[1]✉, *Candidate of Agriculture; ResearcherID: AAH-4016-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2802-1124*
Nikolay P. Gaevskiy[1], *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAK-5430-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9511-004X*
Irina A. Popkova[1], *Candidate of Agriculture; ResearcherID: AAE-1329-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8180-5673*
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.babich@narfu.ru, o.zalyvskaya@narfu.ru, yu.aleksandrova@narfu.ru✉, n.gaevsky@narfu.ru, i.olupkina@narfu.ru
[2]Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, Molochnoe Village, Vologda, 160555, Russian Federation; helen15@yandex.ru

Received on January 23, 2023 / Approved after reviewing on April 18, 2023 / Accepted on April 20, 2023

Abstract. The increasing of the socio-aesthetic significance of urban green spaces, especially in the formation of a rigid urbanized human habitat, initiates the development of the theoretical foundations of stepwise introduction in the northern direction. The aim of the

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

research has been to generalize the regional features of the introduction of dendroflora species in the conditions of the European North of Russia. The methodological basis has been the works of specialists in the field of forest introduction, including Northern introducers F.B. Orlov, P.M. Malakhovets, V.N. Nilov, N.A. Demidova, O.S. Zalyvskaya, E.B. Karbasnikova et al. The results of the research have both theoretical and practical significance and are an integral part of the general theory of step-by-step introduction in the northern direction. In the process of many years of research and generalization of the experience of spontaneous introduction, an original working hypothesis of the stepwise introduction of woody plants in northern natural and climatic conditions has been formed and developed: for the urban environment, the presence of a special microclimate (heat island) is generally recognized and this microclimatic resource is sufficient for the successful naturalization of some species of dendroflora despite the introduction stress. The results of the work of the oldest introduction centres in the European North are briefly described. An algorithm and a regional strategy for the development of research of the introduction process of dendroflora species in the conditions of the North are presented. A conceptual scheme for the introduction testing of dendroflora species in the conditions of the northern latitudes of the Russian Plain has been proposed. There are 4 stages of acclimatization and 3 stages of naturalization. A number of scales have been developed that contribute to the improvement and optimization of introduction tests, and the assessment of sanitary, hygienic and social functions performed by introduced species of dendroflora. The richness of species diversity of urban dendroflora, new to northern conditions, is a good breeding base for further introduction tests and a scientific basis for predicting the success of the stepwise introduction of many valuable woody and shrub species to northern latitudes.

Keywords: stepwise introduction, introduction tests, dendroflora, introductional model, European North, introduction in the northern latitudes, urbanized environment

For citation: Babich N.A., Karbasnikova E.B., Zalyvskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Gaevskiy N.P., Popkova I.A. The Conceptual Model of Dendroflora Introduction in the Northern Latitudes of the Russian Plain. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 66–77. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-66-77

Введение

Развитие теоретических основ ступенчатой интродукции обусловлено формированием экосистем, зависящих от стабильности окружающей среды, а также повышением хозяйственной освоенности ресурсов [10, 16, 25, 32].

Работы в области сохранения и увеличения биоразнообразия в целом и интродукции в частности ведутся на базе ботанических и дендрологических садов, научно-исследовательских и отраслевых институтов и других учреждений. На территории Европейского Севера, включающего Архангельскую и Вологодскую области, Республику Коми, работы по интродукции и акклиматизации хозяйственно-ценных растений осуществляются на базе ботанических и дендрологических садов.

Старейшим пунктом интродукции на Европейском Севере является дендрологический сад им. И.М. Стратоновича при Северном (Арктическом) федеральном университете (САФУ) в г. Архангельске (64°33′с. ш. 40°32′в. д.). С 1934 г. здесь испытаны образцы из разных географических регионов и стран:

Европа, Алтай, Сибирь, Средняя Азия, Дальний Восток, Китай, Япония, Северная Америка. Современную коллекцию сада составляют 217 видов растений – представителей 20 семейств и 52 родов [17, 22, 23].

В окрестностях г. Архангельска в 1960 г. организован дендрологический сад Северного научно-исследовательского института леса и лесохимии (64°33′с. ш. 39°40′в. д.). За период интродукционных испытаний собрана коллекция из 603 видов, относящихся к 75 родам, 31 семейству [9].

Центром интродукционных испытаний представителей дендрофлоры в Республике Коми является дендрологический сад недалеко от с. Выльгорт (62°12′ с. ш. 54°09′ в. д.), основанный на базе питомника плодово-ягодных растений в 1936 г. За многолетний период работы сотрудников сада испытано около 3,5 тыс. видов растений. К настоящему времени в дендрарии собрана коллекция из 550 таксонов [18, 28]. В 1974 г. основан Ботанический сад Сыктывкарского государственного университета (61°38′ с. ш. 50°44′ в. д.). К настоящему времени в коллекцию сада входит около 540 таксонов из 81 семейства [21].

В Вологодской области в 1999 г. начата работа по созданию дендрологического сада (59°16′ с. ш. 39°40′ в. д.) на базе Вологодской государственной молочнохозяйственной академии им. Н.В. Верещагина. Современная коллекция состоит из 260 видов растений, относящихся к 85 родам и 38 семействам [6].

Ботанические и дендрологические сады Европейского Севера России ведут деятельность в следующих областях:

сохранение и пополнение коллекций растений – представителей различных географических дендрофлор;

сохранение генофонда редких и исчезающих видов аборигенной флоры;

исследования в области интродукции и акклиматизации инорайонных видов;

разработка рекомендаций по озеленению населенных мест Европейского Севера;

организация культурно-просветительской работы по распространению научных знаний в области растениеводства, экологии, озеленения и формированию бережного отношения к окружающей среде.

Интродукционные исследования древесных и кустарниковых пород происходят по закономерным научным линиям:

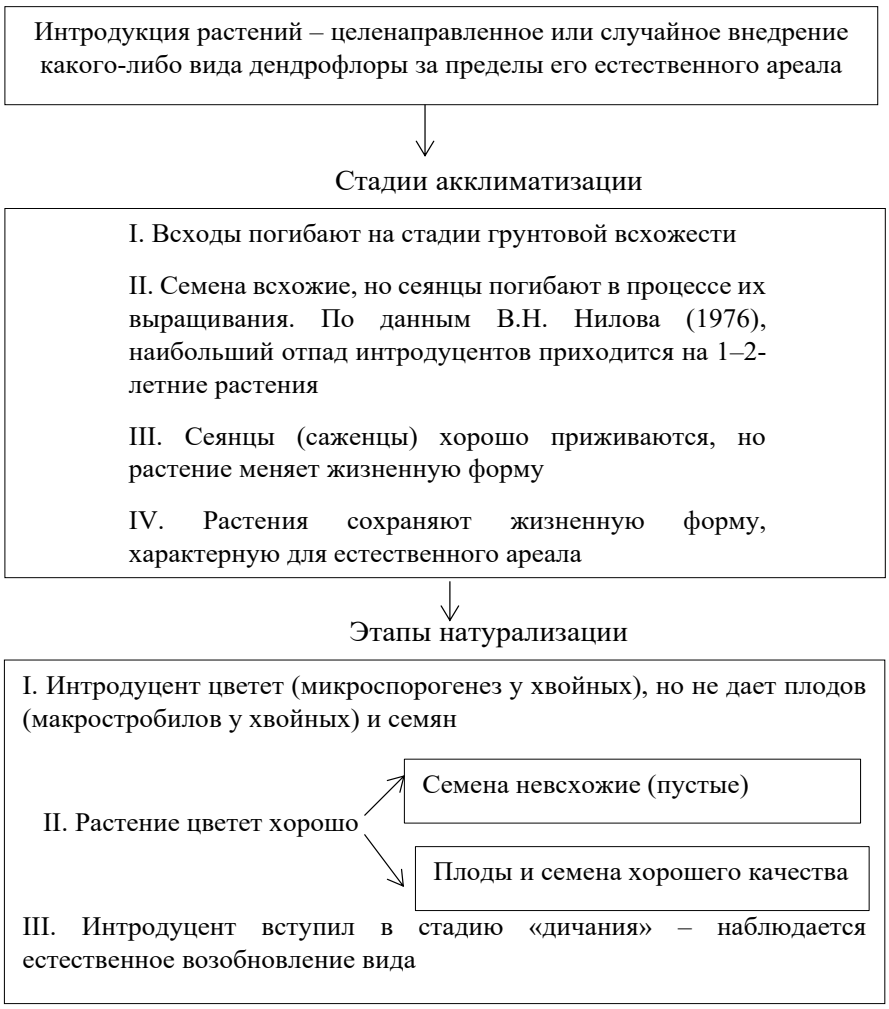
поиск, селекция и интродукционные испытания хозяйственно-ценных лесных пород;

интродукционные испытания пищевых и лекарственных видов дендрофлоры;

исследование акклиматизации и натурализации высокодекоративных деревьев и кустарников в антропогенной среде.

Объекты и методы исследования

К настоящему времени сформировался четкий алгоритм и региональная стратегия исследований интродукционного процесса видов дендрофлоры в условиях Европейского Севера (см. рисунок) [6].



Исходная концептуальная схема интродукционного испытания видов дендрофлоры в условиях Европейского Севера

The initial conceptual scheme for the introduction testing of dendroflora species in the conditions of the European North

За основу стратегии научно-обоснованного развития интродукционных исследований в регионе приняты основополагающие программные труды ученых И.Н. Елагина [11], А.Л. Лыпы [16], Н.Е. Булыгина [8], В.Н. Нилова [25], И.И. Дроздова [10], Т.Б. Сродных [26], А.П. Царева [27], S. Jochner et al. [33], I.J. Chaudhary et al. [31], A. Manangan et al. [34], а также «Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР» [20] и «Программа интродукции лесных пород в европейской части СССР до 2000 г. и далее» [24].

Многолетние исследования и обобщение опыта стихийной интродукции [2, 5, 7, 30] позволили сформулировать и развить оригинальную рабочую

гипотезу ступенчатой интродукции древесных растений в северных природно-климатических условиях: поскольку научным сообществом общепризнано наличие особого микроклимата (островов тепла) в городской среде, то считаем (доказано), что этого микроклиматического ресурса достаточно для успешной натурализации некоторых видов дендрофлоры в условиях интродукционного стресса.

Кроме того, разработан ряд шкал в виде таблиц, вносящих вклад в совершенствование и оптимизацию интродукционных испытаний, оценку санитарно-гигиенических и социальных функций интродуцированных видов дендрофлоры. В основу таблиц положены результаты наблюдений над акклиматизацией видов дендрофлоры в суровых природных условиях Севера с учетом временного и пространственного факторов, которыми определяются изменения в этом процессе.

К таким разработкам можно отнести:

методику определения декоративности видов дендрофлоры [13];

шкалу напряженности интродукционного стресса видов дендрофлоры в условиях севера европейской части Русской равнины [4, 6];

шкалу оценки степени сходства таксономического состава дендрофлор [6];

шкалу оценки пылеудерживающей способности видов боярышника [1].

Результаты исследования и их обсуждение

На кафедре ландшафтной архитектуры и искусственных лесов САФУ разработана методика определения декоративности видов дендрофлоры [13]. В ее основу положено 10 показателей, отражающих декоративность растения: архитектоника кроны, длительность и степень цветения, окраска цветков, их величина, привлекательность внешнего вида плодов, аромат цветов, плодов, листьев, продолжительность облиствения, повреждаемость, зимостойкость. Данная методика оценки декоративности нашла широкое применение в работах российских исследователей, например [15, 19].

Для оценки успешности акклиматизации и натурализации интродуцируемого вида предложена шкала напряженности интродукционного стресса (табл. 1), основанная на обширных многолетних исследованиях интродукции в условиях севера европейской части России.

Коэффициент Жаккара широко используется в фитоценологических исследованиях. Однако, работая с многочисленными литературными источниками, мы не встретили шкалы оценки степени сходства таксономического состава дендрофлор. В итоге нами разработана такая шкала (табл. 2).

Таблица 1

Шкала напряженности интродукционного стресса видов дендрофлоры в условиях севера европейской части Русской равнины [4, 6]
The scale of the intensity of introduction stress of dendroflora species in the conditions of the north of the European part of the Russian Plain [4, 6]

Балл стресса	Степень напряженности стресса	Признаки степени напряженности	Характерные виды
1	Пороговая	Отмечается полная биодеградация, растения погибают	Ракитник двуцветковый, жимолость золотистая, граб обыкновенный
2	Высокая	Деревья меняют жизненную форму. Обмерзает вся надземная часть. Не цветут и не плодоносят. Адаптационная стресс-реакция интродуцентов выражена достаточно хорошо	Боярышник алматинский, клен Траутветтера, каштан конский, форзиция европейская
3	Умеренная	Характерны уменьшение морфометрических показателей хвои (листьев), вегетативных и генеративных почек, переход растений в III класс высоты. Обмерзают 2-летние побеги. Растения цветут, но урожай не формируется	Пихта бальзамическая, дуб красный, малина нутканская, вишня сахалинская, форзиция промежуточная
4	Низкая	Наблюдается переход растений во II класс высоты, незначительное обмерзание 1-летних побегов. Цветение и плодоношение, качество плодов и семян удовлетворительные. Растения сохраняют декоративность	Вяз гладкий, клен остролистный, липа мелколистная, магония падуболистная
5	Очень низкая	Растения обладают выраженной устойчивостью к воздействию интродукционных стрессов, успешно приживаются, растут и развиваются, вступают в репродуктивную фазу, сохраняют жизненную форму, характерную для естественного ареала произрастания, соответствуют цели интродукции	Сосна кедровая сибирская, тополь бальзамический, карагана древовидная, сирень венгерская, роза морщинистая

Таблица 2

Шкала оценки степени сходства таксономического состава дендрофлор [6]
The scale for assessing the degree of similarity of the taxonomic composition of dendrofloras [6]

Группа сходства	Коэффициент сходства, K_1*	Характеристика сходства
I	≤ 0,25	Очень слабое. При увеличении численности таксонов дендрофлор и уменьшении количества таксонов, общих для сравниваемых флор, коэффициент сходства приближается к 0
II	0,26–0,50	Слабое
III	0,51–0,75	Близкое
IV	0,76–1,00	Очень близкое. При абсолютном равенстве числа таксонов сравниваемых дендрофлор и числа общих таксонов для 2 флор коэффициент сходства равен 1

*При сравнении степени сходства таксономического состава рассматриваемых дендрофлор использован коэффициент Жаккара, рассчитываемый по формуле $K_1 = c / (a+b-c)$, где a, b – число таксонов в каждой из 2 сравниваемых флор; c – число общих для 2 флор таксонов.

При внедрении в городские зеленые насаждения интродуцированных видов дендрофлоры для комплексной оценки немаловажно знать их пылеудерживающую способность. Безусловно, при прочих равных показателях интродуктор отдает предпочтение растению с наиболее высокой пылеудерживающей способностью. Предлагаемая нами шкала (табл. 3) является дополняющей и уточняющей шкалу оценки пылеудерживающей способности древесных и кустарниковых пород О.В. Чернышенко [29].

Таблица 3

Шкала оценки пылеудерживающей способности видов [1]
The scale for assessing the dust retention capacity of species [1]

Масса удерживаемой пыли, г/м²	Оценка пылеудерживающей способности	
	Степень	Балл
<1	Крайне низкая	1
1,1–3	Умеренная	2
3,1–5	Средняя	3
5,1–7	Высокая	4
>7	Наиболее высокая	5

Богатство видового разнообразия новых для северных условий растений городской дендрофлоры является хорошей селекционной базой для дальнейших интродукционных испытаний и научной основой прогноза успешности ступенчатой интродукции многих ценных древесных и кустарниковых видов в северные широты.

Перспектива последующего развития интродукции заключается в обобщении накопившегося опыта садоводов-любителей на дворовых территориях города и загородных участках. Кроме того, необходимо учитывать сформировавшийся опыт озеленения старинных городов, в т. ч. и парков [2, 3, 12, 14].

Карта продвижения интродуцированных видов дендрофлоры в северном направлении заключается в следующем: 1-е поколение интродуцентов выращивается в городских зеленых насаждениях островов тепла с дальнейшим продвижением 2-го поколения в зеленую зону городов с постановкой опытов их культивирования по производственным технологиям.

Заключение

Реализация комплексных исследований интродукции растений в северные широты Русской равнины с участием физиологов, экологов, генетиков и других специалистов позволит значительно оптимизировать процесс обогащения биоразнообразия местной дендрофлоры отселектированными наиболее хозяйственно-ценными и устойчивыми к северным природно-климатическим условиям региона видами деревьев и кустарников.

Наряду с проведением теоретических многоплановых исследований успешности интродукции видов дендрофлоры в северных природно-климатических условиях важным направлением развития интродукции считаем разработку агротехники выращивания посадочного материала хозяйственно-ценных видов.

Следует признать, что вопросы разработки, а для некоторых пород – уточнения, агротехники выращивания посадочного материала интродуцентов являются современной необходимостью, завершающим этапом интродукционных испытаний не одного десятка особо ценных древесных и кустарниковых пород как в биологическом (обогащение биоразнообразия), так и хозяйственном планах. Это направление интродукционных исследований заслуживает самого пристального внимания дендрологов-интродукторов и является приоритетным для природно-климатических условий Европейского Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Александрова Ю.В.* Интродукция видов рода *Crataegus* L. в дендрологическом саду имени И.М. Стратоновича: автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Архангельск, 2021. 20 с.

Aleksandrova Yu.V. *Introduction of Species of the Genus Crataegus L. in the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2021. 20 p. (In Russ.).

2. *Андронова М.М., Бабич Н.А., Хамитов Р.С.* Ступенчатая интродукция древесных растений на севере Русской равнины: моногр. Архангельск: САФУ, 2021. 412 с.

Andronova M.M., Babich N.A., Khamitov R.S. *Stepwise Introduction of Woody Plants in the North of the Russian Plain*: Monograph. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2021. 412 p. (In Russ.).

3. *Андронова М.М.* Рекомендации по приоритетному ассортименту древесных растений для озеленения малых городов и поселков Вологодской области. Архангельск: САФУ, 2017. 52 с.

Andronova M.M. *Recommendations on the Priority Assortment of Woody Plants for Landscaping Small Towns and Villages of the Vologda Region*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2017. 52 p. (In Russ.).

4. *Бабич Н.А., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Попкова И.А., Гаевский Н.П., Андронова М.М., Карбасникова Е.Б.* Аспекты интродукции на Европейском Севере // Оптимизация лесопользования: материалы Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 70-летию Почет. работника высш. образования, Заслуж. лесовода России Залесова Сергея Вениаминовича. Екатеринбург, 2023. С. 197–203.

Babich N.A., Zalivskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Popkova I.A., Gaevsky N.P., Andronova M.M., Karbasnikova E.B. Aspects of Introduction in the European North. *Optimization of Forest Management*: Materials of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference with International Participation. Ekaterinburg, 2023, pp. 197–203. (In Russ.).

5. *Бабич Н.А., Залывская О.С., Травникова Г.И.* Интродуценты в зеленом строительстве северных городов: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 144 с.

Babich N.A., Zalyvskaya O.S., Travnikova G.I. *Introduced Species in Green Construction of Northern Cities:* Monograph. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 144 p. (In Russ.).

6. *Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б.* Натурализация видов дендрофлоры в условиях интродукционного стресса: моногр. Архангельск: Изд. дом им. В.Н. Булатова САФУ, 2022. 236 с.

Babich N.A., Karbasnikova E.B. *Naturalization of Dendroflora Species under Conditions of Introduction Stress*: Monograph. Arkhangelsk, Publ. House named after V.N. Bulatov of the Northern (Arctic) Federal University, 2022. 236 p. (In Russ.).

7. *Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Долинская И.С.* Интродуценты и экстразональные виды в антропогенной среде (на примере г. Вологды): моногр. Архангельск: САФУ, 2012. 184 с.

Babich N.A., Karbasnikova E.B., Dolinskaya I.S. *Introduced and Extrazonal Species in the Anthropogenic Environment* (*by the Example of the City of Vologda*): Monograph. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2012. 184 p. (In Russ.).

8. *Булыгин Н.Е.* Фенологические наблюдения над древесными растениями. Л.: ЛТА, 1979. 97 с.

Bulygin N.E. *Phenological observations of Woody Plants*. Leningrad, Leningrad Forest Engineering Academy Publ., 1979. 97 p. (In Russ.).

9. *Демидова Н.А., Нилов В.Н.* Интродукционное районирование Европейского Северо-Востока России // Науч. вед. БелГУ. Сер.: Естеств. науки. 2012. № 9(128), вып. 19. С. 36–44.

Demidova N.A., Nilov V.N. Introduction Zoning of the European North-East of Russia. *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Estestvennye nauki* = Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences, 2012, no. 9(128), iss. 19, pp. 36–44. (In Russ.).

10. *Дроздов И.И.* Программа интродукции кедра сибирского в европейскую часть СССР. М.: ЛТИ, 1991. 56 с.

Drozdov I.I. *Program of the Introduction of Siberian Cedar into the European Part of the USSR*. Moscow, Forest Engineering Institute Publ., 1991. 56 p. (In Russ.).

11. *Елагин И.Н.* Методика определения фенологических фаз у хвойных // Ботан. журн. 1961. Т. 46, № 7. С. 984–992.

Elagin I.N. Methodology for Determining Phenological Phases in Conifers. *Botanicheskij zhurnal*, 1961, vol. 46, no. 7, pp. 984–992. (In Russ.).

12. *Залывская О.С., Бабич Н.А.* Рекомендации по ассортименту древесных и кустарниковых пород в городах Архангельской агломерации. Архангельск: САФУ, 2019. 90 с.

Zalyvskaya O.S., Babich N.A. *Recommendations on the Assortment of Tree and Shrub Species in the Cities of the Arkhangelsk Agglomeration*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2019. 90 p. (In Russ.).

13. *Залывская О.С., Бабич Н.А.* Шкала комплексной оценки декоративности деревьев и кустарников в городских условиях на Севере // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. № 1(15). С. 96–104.

Zalyvskaya O.S., Babich N.A. Scale of Complex Assessment of Trees and Shrub Decorativeness in Northern Cities. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2012, no. 1(15), pp. 96–104. (In Russ.).

14. *Карбасникова Е.Б., Бабич Н.А.* Рекомендации по ассортименту древесных и кустарниковых растений для озеленения промышленных городов Вологодской агломерации. Архангельск: САФУ, 2021. 60 с.

Karbasnikova E.B., Babich N.A. *Recommendations on the Assortment of Woody and Shrubby Plants for Landscaping Industrial Cities of the Vologda Agglomeration*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2021. 60 p. (In Russ.).

15. *Карбасников А.А., Назарова Д.А.* Комплексная оценка декоративности лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) // НИРС – шаг в науку: материалы науч.-практ. конф. Вологда–Молочное: Волог. гос. молочнохоз. акад. им. Н.В. Верещагина, 2017. С. 37–40.

Karbasnikov A.A., Nazarova D.A. Comprehensive Assessment of the Ornamental Value of Siberian larch (*Larix sibirica*). *NIRS – shag v nauku*: Materials of the Scientific and Practical Conference. Vologda–Molochnoye, Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, 2017, pp. 37–40. (In Russ.).

16. *Лыпа А.Л.* Методологические и методические предпосылки к проведению работ по ступенчатой акклиматизации растений // Бюл. Гл. ботан. сада.1965. Вып. 59. С. 3–8.

Lypa A.L. Methodological and Methodical Prerequisites for Carrying out Work on the Stepwise Acclimatization of Plants. *Bulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin Main Botanical Garden, 1965, iss. 59, pp. 3–8. (In Russ.).

17. *Малаховец П.М., Тисова В.А.* Декоративные деревья и кустарники на Севере. Архангельск, 2002. 127 с.

Malakhovets P.M., Tisova V.A. *Ornamental Trees and Shrubs in the North*. Arkhangelsk, 2002. 127 p. (In Russ.).

18. *Мартынов Л.Г.* Оценка интродукции древесных растений восточноазиатской флоры в ботаническом саду Института биологии Коми научного центра // Науч. тр. Чебокс. фил. Гл. ботан. сада им. Н.В. Цицина РАН. 2018. № 11. С. 67–71.

Martynov L.G. Evaluation of the Introduction of Woody Plants of East Asian Flora in the Botanical Garden of the Institute of Biology of the Komi Science Center. *Nauchnye trudy Cheboksarskogo filiala Glavnogo botanicheskogo sada im. N.V. Tsitsina RAN*, 2018, no. 11, pp. 67–71. (In Russ.).

19. *Маштаков Д.А., Терешкин А.В., Щербакова А.А.* Оптимизация ассортимента древесных пород на территориях детских оздоровительных лагерей правобережья Саратовской области // Науч. жизнь. 2018. № 5. С. 89–97.

Mashtakov D.A., Tereshkin A.V., Shcherbakova A.A. Optimization of Tree Species Assortment at the Children's Health Camps Territories on the Saratov Region Volga Right Bank. *Nauchnaya zhizn'* = Scientific Life, 2018, no. 5, pp. 89–97. (In Russ.).

20. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР // Бюл. Гл. ботан. сада. 1979. Вып. 113. С. 3–8.

Methodology of Phenological Observations in the Botanical Gardens of the USSR. *Bulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin Main Botanical Garden, 1979, iss. 113, pp. 3–8. (In Russ.).

21. *Новаковская Т.В.* Естественная растительность ботанического сада Сыктывкарского государственного университета // Сб. науч. тр. Гос. Никитск. Ботан. сада. 2016. Т. 143. С. 133–139.

Novakovskaya T.V. Natural Vegetation of the Botanical Garden of Syktyvkar State University. *Sbornik nauchykh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo Botanicheskogo sada* = Works of the State Nikita Botanical Gardens, 2016, vol. 143, pp. 133–139. (In Russ.).

22. *Орлов Ф.Б.* Дендрарий Архангельского лесотехнического института // Лесн. хоз-во. 1952. № 7. С. 91.

Orlov F.B. Arboretum of the Arkhangelsk Forestry Institute. *Lesnoe khozyajstvo*, 1952, no. 7, p. 91. (In Russ.).

23. *Попкова И.А.* Интродукция видов рода *Acer* L. в дендрологическом саду им. И.М. Стратоновича: автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Архангельск, 2022. 20 с.

Popkova I.A. *Introduction of Species of the Genus Acer L. in the Dendrological Garden named after I.M. Stratonovich*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2022. 20 p. (In Russ.).

24. Программа интродукции лесных пород в европейской части СССР до 2000 г. и далее // Лесохоз. информ. 1992. № 2. С. 15–16.

The program of Introduction of Forest Species in the European Part of the USSR until 2000 and Beyond. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 1992, no. 2, pp. 15–16. (In Russ.).

25. Рекомендации по ассортименту древесных растений для озеленения городов и поселков Севера / сост. В.Н. Нилов. Архангельск: АИЛиЛХ, 1981. 19 с.

Recommendations on the Assortment of Woody Plants for Landscaping Cities and Towns in the North. Comp. by V.N. Nilov. Arkhangelsk, Arkhangelsk Forest and Forest Chemistry Institute Publ., 1981. 19 p. (In Russ.).

26. *Сродных Т.Б.* Состояние и концептуальные направления озеленения северных городов Западной Сибири: автореф. дис. … д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2008. 42 с.

Srodnykh T.B. *The State and Conceptual Directions of Landscaping of Northern Cities of Western Siberia*: Doc. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg. 2008. 42 p. (In Russ.).

27. Царёв А.П. Программы лесной селекции в России и за рубежом: моногр. М.: МГУЛ, 2013. 164 с.

Tsarev A.P. *Forest Breeding Programs in Russia and Abroad*: Monograph. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2013. 164 p. (In Russ.).

28. *Чарочкин М.М.* Экзоты на Севере // Бюл. Гл. ботан. сада. 1960. Вып. 36. С. 29–37.

Charochkin M.M. Exotics in the North. *Bulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin Main Botanical Garden, 1960, iss. 36, pp. 29–37. (In Russ.).

29. *Чернышенко О.В.* Поглотительная способность и газоустойчивость древесных растений в условиях города: автореф. дис. … д-ра биол. наук. М., 2001. 36 с.

Chernyshenko O.V. *Absorption Capacity and Gas Resistance of Woody Plants in Urban Conditions*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2001. 36 p. (In Russ.).

30. Atkins E. Chapter 3.15 – Green Streets as Habitat for Biodiversity. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, UK, Oxford, Butterworth-Heimann, 2018, pp. 251–260. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00023-9

31. Chaudhary, I.J., Rathore D. Dust Pollution: Its Removal and Effect on Foliage Physiology of Urban Trees. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 51, art. no. 101696. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101696

32. Good R.D. A Theory of Plant Geography. New Phytologyst, 1931, vol. 30, iss. 3, pp. 149–171. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1931.tb07414.x

33. Jochner, S., Menzel A. Urban Phenological Studies – Past, Present, Future. *Environmental Pollution*, 2015, vol. 203, pp. 250–261. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.003

34. Manangan A., Brown C., Saha S., Bell J., Hess J., Uejio C., Fineman S., Schramm P. Long-Term Pollen Trends and Associations between Pollen Phenology and Seasonal Climate in Atlanta, Georgia (1992–2018). *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 2021, vol. 127, iss. 4, pp. 471–480. https://doi.org/10.1016/j.anai.2021.07.012

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Original article
УДК 630*581(1+823):574.2:502.2.08
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-78-89

Variability of Anatomical Characteristics of the Wood of Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the Conditions of the North Caucasus

Mukhadi U. Umarov*[1], *Doctor of Biology, Academician of the Academy of Sciences of the Chechen Republic; *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7623-9400*
Evgenia S. Chavchavadze*[2], *Doctor of Biology; *ResearcherID: KCK-3338-2024, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5508-3403*
Roman V. Shchekalev*[3]✉, *Doctor of Agriculture; *ResearcherID: AAH-3861-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7657-1705*
Veronika O. Romanova*[2], *Junior Research Scientist; *ResearcherID: KCK-3302-2024, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3892-356X*
Ruslan M. Umarov*[1], *Candidate of Biology; *ResearcherID: KHX-0378-2024, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3529-4232*
[1]Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Staropromyslovskoe sh., 21a, Grozny, 364051, Russian Federation; umrusmuh@mail.ru
[2]Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, ul. Professora Popova, 2, letter B, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation; echavcha@yandex.ru, VRomanova@binran.ru
[3]Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; schekalevrv@yandex.ru✉

Received on July 12, 2023 / Approved after reviewing on October 6, 2023 / Accepted on October 9, 2023

Abstract. The article presents the results of a study of the structure of the wood of mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the mountains of the North Caucasus. The direction of adaptive changes occurring in the elements of the secondary xylem of the plant at various heights, including extreme ones, is shown. The conclusions of a number of studies have been confirmed that the basic reaction of mountain ash with an increase in altitude and a decrease in growing capacity, as well as an increase in the intensity of transpiration, is a decrease in plant size and a narrowing of the annual growth of the stem in diameter. At the same time, a number of quantitative changes occur in the wood itself, mainly aimed at optimizing the water-transporting function. With increasing altitude, as water supply conditions become more stringent, maintaining normal water balance is achieved by narrowing the diameters of vessels and increasing their number per unit area. The increase in the total area of the pores occurs due to an increase in the number of narrow, single vessels. The quantitative anatomical changes established during the study are adaptive in nature. In the storage parenchyma of wood, there is an increase in the density and linear dimensions of the rays. The volume of the radial parenchyma at a relatively constant average ply value occurs due to an increase in the height of the cells composing the ray. It is noted that sufficient water balance and enrichment of *Sorbus aucuparia* wood with living cells of the axial and radial parenchyma increases the viability and plasticity of the entire organism, covers the energy costs for reparation processes, and also stimulates the possibility of vegetative reproduction in conditions unfavorable for seed renewal. A significant range of fluctuations in the quantitative characteristics of mountain ash wood elements increases its adaptive capabilities, helping it to occupy a variety of ecological niches in nature, as evidenced by the wide range of this species.
Keywords: mountain ash, wood, xylem, water-transporting tissue, annual ring, xylotomic signs, adaptation, the North Caucasus

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

For citation: Umarov M.U., Chavchavadze E.S., Shchekalev R.V., Romanova V.O., Umarov R.M. Variability of Anatomical Characteristics of the Wood of Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the Conditions of the North Caucasus. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 78–89. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-78-89

Научная статья

Изменчивость анатомических характеристик древесины рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) в условиях Северного Кавказа

***М.У. Умаров*[1],** *д-р биол. наук, акад. АН Чеченской Республики;*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7623-9400
***Е.С. Чавчавадзе*[2],** *д-р биол. наук; ResearcherID: KCK-3338-2024,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5508-3403
***Р.В. Щекалев*[3]✉,** *д-р с.-х. наук; ResearcherID: AAH-3861-2019,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7657-1705
***В.О. Романова*[2],** *мл. науч. сотр.; ResearcherID: KCK-3302-2024,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3892-356X
***Р.М. Умаров*[1],** *канд. биол. наук; ResearcherID: KHX-0378-2024,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3529-4232
[1]Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, ш. Старопромысловское, д. 21а, г. Грозный, Россия, 364051; umrusmuh@mail.ru
[2]Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, ул. Проф. Попова, д. 2, литера В, Санкт-Петербург, Россия, 197022; echavcha@yandex.ru, VRomanova@binran.ru
[3]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; schekalevrv@yandex.ru✉

Поступила в редакцию 12.07.23 / Одобрена после рецензирования 06.10.23 / Принята к печати 09.10.23

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры древесины рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) в условиях гор Северного Кавказа. Показано направление адаптационных изменений в элементах вторичной ксилемы растения на различных, в т. ч. предельных, высотах. Подтверждены выводы ряда исследований о том, что базовой реакцией рябины с подъемом в горы и снижением энергии роста, а также увеличением интенсивности транспирации является уменьшение размеров растения и снижение годового прироста ствола по диаметру. Одновременно с этим в древесине происходит ряд количественных изменений, связанных главным образом с оптимизацией водопроводящей функции. С высотой, по мере ужесточения условий водоснабжения, сохранение нормального водного баланса достигается сужением сосудов и увеличением их числа на единицу площади древесины ствола. Возрастание суммарной площади просветов происходит за счет повышения числа узких одиночных сосудов. Установленные в ходе исследования количественные анатомические изменения носят адаптивный характер. В запасающей паренхиме древесины увеличиваются густота и линейные размеры лучей. Объем лучевой паренхимы при относительно постоянной средней слойности нарастает за счет увеличения высоты слагающих луч клеток. Отмечено, что достаточный водный баланс и обогащение древесины *Sorbus aucuparia* живыми клетками аксиальной и лучевой паренхимы повышают жизнеспособность и пластичность всего организма, покрывают энергетические затраты на репарационные

© Умаров М.У., Чавчавадзе Е.С., Щекалев Р.В., Романова В.О., Умаров Р.М., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

процессы, а также стимулируют возможность вегетативного размножения в неблагоприятных для семенного возобновления условиях. Значительный диапазон флуктуации количественных признаков элементов древесины рябины повышает ее адаптивные возможности, помогая занимать в природе разнообразные экологические ниши, о чем свидетельствует широкий ареал этого вида.
Ключевые слова: рябина обыкновенная, древесина, ксилема, водопроводящая ткань, годичное кольцо, ксилотомические признаки, адаптация, Северный Кавказ

Для цитирования: Umarov M.U., Chavchavadze E.S., Shchekalev R.V., Romanova V.O., Umarov R.M. Variability of Anatomical Characteristics of the Wood of Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the Conditions of the North Caucasus // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 78–89. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-78-89

Introduction

Adaptation of plants to a variety of environmental situations, including extreme ones, represents one of the problems that ecological botany investigates. Mountain forests occupy a significant place in the vegetation cover of Russia with woody plants constituting the basis. The increasing frequency of natural disasters, such as forest fires, floods and mudflows, has led to a reduction in forest areas, including in the mountainous regions of our country. The Restoration of the affected areas and the creation of new artificial stands require a well-founded approach, knowledge of the biological and environmental characteristics of all the components included in the various layers of a mountain forest. One of these components is mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.).

Ecological and anatomical studies of woody plants in connection with their altitude-based distribution provide significant clarity in solving these problems, which makes it possible to understand the directions of their structural adaptation to mountain conditions [33]. Such research is becoming increasingly relevant in our time. The ecology of forest-forming species is one of the foundations of mountain forestry, the development of which serves as a guarantee of effective and balanced forestry activities [11, 12, 30].

Our study aims to investigate the quantitative xylotomic characteristics of mountain ash in connection with the altitude above sea level in the mountains of the North Caucasus.

Research Objects and Methods

In mountainous areas, with an increase in altitude above sea level, changes in physical-geographical, phytocenotic, and edaphic conditions, and altitudinal zonality of the climate manifests itself. It is believed that for every 100 m of elevation the temperature decreases by slightly less than 0.5 °C. At the same time, the relative humidity and the amount of precipitation increases, atmospheric pressure decreases, and the ratio of direct and diffuse radiation, as well as the movement of air masses and other factors change [4, 5, 9]. The listed characteristics change with altitude in an interconnected manner, exerting a certain effect on the habitat conditions of plants. On this basis, we consider altitude above sea level as a complex environmental factor.

The species selected for our study has become mountain ash, a tree of 4 to 15 (20) m high with a stem diameter of up to 18–20 cm in diameter. In Russia, it is a widespread species in the forests of the European part and the North Caucasus, growing as undergrowth in coniferous and coniferous-deciduous forests. Mountain ash is quite winter-hardy, drought-resistant and undemanding to soil resources [10]. In the mountains of the North Caucasus it is found everywhere from an altitude of 850 to 2,500 meters above sea level (hereinafter – masl), predominantly on northern slopes [2, 8, 28, 29].

Mountain ash has a diffuse-porous type of wood with distinct annual rings. Their border is represented by a narrow strip of radially flattened fibrous tracheids and terminal parenchyma cells. The transition from spring to summerwood can be both gradual and relatively abrupt. Vessels are all of the same type and numerous, with their number and size slightly decreasing towards summerwood. In cross-section, the pores of the vessels are of angular, round and oval shape, positioned singly or, less often, in pairs and small groups of 3 to 4, their diameter varies within 15–50 μm. The perforation plates are mostly simple, located on transverse, strongly beveled or lateral walls. In pessimal habitat conditions, scalariform perforation plates with a small number (1 to 3) of crossbars are found; reticulate perforation plates are even less common.

Fibrous tracheids with fairly thickened walls make up the bulk of the wood. The bordered pores on the walls of the tracheids are rounded; the apertures are elongated, often slit-like, reaching the border limits, often intersecting.

The axial parenchyma is diffuse, more often metatracheal from scanty to abundant. The rays are 2-to-3-rowed, homogeneous and slightly heterogeneous, in cross section they are usually narrower than the vessels; meeting the latter, the rays bend, bypassing them. On the tangential section, the rays are represented by two types of cells: those elongated along the axis of the tree make up single-rowed rays or are located at the edge of a three-rowed ray with smaller, rounded cells in the middle of it. In a radial section, the cells that make up the central part of the rays are horizontally elongated; the marginal cells are often slightly higher than the middle ones.

The material for our study has been collected in the western part of the North Caucasus on the territory of the Tersky Ridge along the Kerigo, Tyualoy, Chanty-Argun, and Sharo-Argun Rivers (Table 1). The samples of wood for analysis of the anatomical structure have been collected from individual *Sorbus aucuparia* specimens of up to 40 years of age. The collectors have observed the principle of the equivalence of the ecological conditions of growth of individual plants (for example, the comparability of slope exposure).

Individually growing specimens have been selected on the slopes of the northern rhumb mountains with approximately the same stem diameters, except for the material collected at the upper limits of the forest belt. In tall plants, transverse cuts have been taken at a height of 30 cm from the soil surface, and in low-growing specimens at a height of 10 cm. This made it possible to obtain a sufficient amount of material for further research (30 trees for each height). After measuring the width of the annual rings, 2 to 4 segments (depending on the diameter of the disk) have been cut out to study the linear dimensions of the structural elements of wood in the definitive xylem zone.

Table 1

The description of the research objects

Altitude, masl	Slope exposure	Habitat
1,400	North	The left flank of the Kerigo River gorge (lower reach) – the right tributary of the Chanty-Argun River. Floodplain forest
1,900	Northwest	The right flank of the Tyualoy River gorge – the left tributary of the Kerigo River. Mixed forest
2,450		The vicinity of the Tebulo Pass (side ridge). The upper reach of the Tyualoy River. Birch crooked forest. The upper forest line
2,480	North	The upper reach of the Sharo-Argun River. The vicinity of the Kachu Pass (side ridge). Rhododendron-birch forest. The upper forest line

Sections for quantitative anatomical analysis have been prepared using the Reichert freezing microtome (Austria) in 3 projections: transverse, tangential and radial. Xylotomic descriptions have been performed in accordance with generally accepted methods [18, 19, 35].

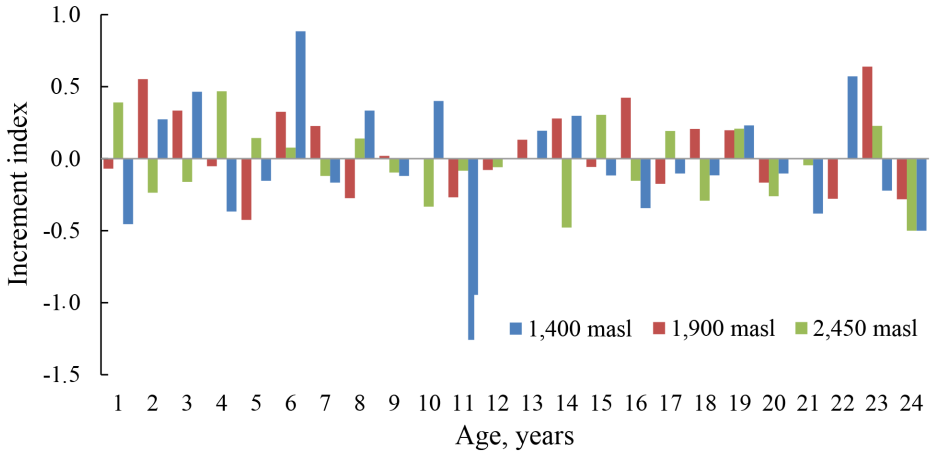
The following parameters have been studied: the width of the annual ring, the number of vessels per unit area in spring and summerwood, the diameter of the vessels and the thickness of their walls, the number of axial parenchyma cells per unit area and the number of rays per a millimeter of tangential section (total, single-rowed and two- or three-rowed), the layering (height in cells) and the linear height of the rays in μm. The terminology of the International Association of Wood Anatomists (IAWA) has been used [34].

The obtained data has been processed using the methods of correlation, factor and variance analysis, etc. [7, 13, 16, 17, 26, 27]. The findings are significant at a 5 % significance level.

Results and Discussion

In the secondary xylem of woody plants (coniferous and dicotyledonous angiosperms), the most responsive element to any change in the environment is the width of the annual ring [14, 24, 25, 30]. The vast majority of the obtained tree-ring chronologies show a significant sensitivity to annual climate changes (sensitivity coefficient from 0.319 to 0.586). The exceptions concern individual series of radial increment in samples collected from a maximum altitude of more than 2,000 m. Spatial analysis of the synchronicity of tree ring fluctuations along the mountain ash stem radius failed to reveal any significant correlation between the chronologies at different altitudes. It has revealed a tendency towards increasing restrictions on the freedom of fluctuations in increment with altitude, which has been demonstrated by the dynamics of the increment index (see Figure). The range of scatter of values by module has been: 2.14 for the altitude of 1,400 masl, 1.06 for 1,900 masl and 0.97 for 2,450 masl.

It has been previously noted that the fluctuation in the width of annual rings demonstrate a certain inertia due to the physiological mechanisms of the formation of increment and its structural elements [1, 21]. The obtained chronologies show the presence of a connection between the current year increment and the previous period. The autocorrelation values with a one-year lag (r_1) for the original tree-ring chronologies vary in the range from 0.234 to 0.821 (the correlation ratio spreads from weak to high). In this case, we can only talk about the trend of a correlation ratio (r_1) increase with the increase in altitude above sea level. The evaluation the autocorrelation function with a time lag of more than one year has allowed us to judge the presence of pronounced cyclical fluctuations of varying intensity. Due to the insignificant length of the considered mountain ash increment series, the maximum time lag has been taken to be 7 years ($r_2 \ldots r_7$). In our case, for both individual and aggregated increment series, no clear markers of the presence of short-period increment cycles have been identified based on the habitat altitude, since the first-order autocorrelation coefficient turned out to be the highest.



The dynamics of mountain ash increment index change at different altitudes

At high altitudes (of 2,450 to 2,480 masl), narrower rings are more common; their boundaries are difficult to distinguish, since the summerwood is very thin-walled and fairly narrow. A sharp narrowing of annual rings in some years is observed in plants even in lower levels of habitats. At the upper forest line, individual or group rings are often wedged out, in which case multiple or "false" rings are formed.

By analyzing the variability of the width of annual rings in a single time series, we are essentially considering the dynamics of xylem production by the elementary unit of cambium. In this case, when comparing different radii, endogenous variability intervenes with the increment dynamics. The value of this indicator fluctuates on average from 38 to 42 %. With the deterioration of soil and hydrological conditions, using the example of gymnosperms of the taiga zone, a narrowing of the radial increment values range has been noted. Trees become no longer capable of fully materializing their abilities [23]. In our example, no significant differences have been found in the magnitude of endogenous variability in diameter increment depending on altitude above sea level. An excess of the value of individual variability within individual locations over the level of geographic variability has been noted, which seems logical [22].

Many researchers have found out that woody plants most often respond to any negative external influence in a non-specific manner, by developing narrow annual rings [3, 15, 20, 31, 32]. The narrowing of the increments and the reduction of the vascular pores in response to a more adverse environment (Table 2), in our case expressed through an increase in altitude above sea level, should have led to a reduction in the water-transporting tissue volume. However, at the same time, we observe in a separate part a significant (when comparing a successive series of lower altitudes: 1,400–2,450; 2,480 and 1,900–2,450; 2,480) an increase in the number of vessels per 1 mm^2. The total number of vessels per unit area in mountain ash wood varies more at the upper habitat limit: 17–22 % at altitudes up to 1,900 masl and 24–28 % at an altitude of 2,450 masl.

Table 2

The size of the vessel pores in spring- and summerwood of *Sorbus aucuparia* ($M \pm m$)

Altitude, masl	Annual ring width, mm	Vessel pores			
		Springwood		Summerwood	
		Quantity, pcs/mm^2	Tangential diameter, μm	Quantity, pcs/mm^2	Tangential diameter, μm
1,400	0.87 ± 0.07	293 ± 23	35.0 ± 1.75	172 ± 18	25.7 ± 1.25
1,900	0.73 ± 0.06	380 ± 26	32.4 ± 1.54	252 ± 22	27.8 ± 1.26
2,450	0.58 ± 0.05	664 ± 26	22.8 ± 1.08	259 ± 22	20.5 ± 0.90
2,480	0.59 ± 0.05	597 ± 35	22.8 ± 1.15	299 ± 24	19.1 ± 0.84

The density and diameter of the vessels are directly related to the rate of water supply to the crown and, undoubtedly, the relationship between the number of vessels and the narrowing of their diameters is the most logical response for maintaining the total area of water-transporting routes and the normal water supply.

With an increase in the habitat altitude, the parenchymal elements, in contrast to the water-transporting ones, experience only minor changes. No significant values have been found in the dynamics of numerical parameters and linear dimensions of individual axial and radial parenchyma elements.

The axial parenchyma is very labile. Its volume can vary greatly both within a one annual ring and over the stem in height and radius. In our study, no patterns of distribution of axial parenchyma depending on the age of the plant have been found in *Sorbus aucuparia* wood. Within one annual increment, the axial parenchyma cells can show different distribution patterns: most often they are concentrated in the summerwood zone, but can be evenly scattered throughout the annual ring (diffuse parenchyma) or form narrow strips of up to 4 cells at the outer increment border (terminal parenchyma).

With an increase in the habitat altitude, an increase in the density of axial parenchyma cells is noted in mountain-ash wood: 255±31 at 1,400 masl; 417±28 at 1,900 masl; 527±39 at 2,450 masl; 591±33 at 2,480 masl ($t_{act} > t_{table}$ (2.04) when comparing data at 1,400–1,900; 2,450; 2,480 and 1,900–2,450; 2,480). The range

of variability at different altitudes varies from 18 to 39 %. The magnitude of variability of the considered parameter does not correlate with the volume of parenchyma in the annual ring.

Radial rays make up a significant part of the parenchyma volume. There are no clearly defined patterns in their distribution and quantity. The number and ratio of differently rowed rays remain to a certain extent constant values (Table 3). In different habitats at different altitudes above sea level, the content and ratio of differently rowed rays in wood is not the same. There is a tendency for the density of rays to increase by 1 mm with an increase in altitude above sea level (the actual Student's t-test values do not exceed t_{table} of 2.04), with the variability at different altitudes from 26 to 30 %. Given a conditionally constant average value of two and three-rowed rays, the number of single-rowed rays increases by 2 times with the ascent into the mountains. And while at altitudes of 1,400 and 1,900 masl, two-rowed rays prevail over single-rowed ones, at extreme altitudes single-rowed rays prevail. Thus, the ratio of the considered groups of rays by rows, when moving towards the upper habitat limit, tends towards the range of 1.0 to 1.1.

Table 3

The average values of the radial parenchyma parameters of *Sorbus aucuparia*

Altitude, masl	Number of rays, pcs/mm				Ray height, mm			
					Single-rowed		Two-, Three-rowed	
	total	single-rowed	two-, three-rowed	ratio	Layering, n-cells	Linear height, mm	Layering, n-cells	Linear height, mm
1,400	8.5 ± 0.6	3.2	5.3	0.60	5.4 ± 0.4	95.6 ± 13.0	11.4 ± 1.0	178.6 ± 23.1
1,900	10.2 ± 0.8	3.7	6.5	0.57	5.3 ± 0.4	94.2 ± 12.2	11.3 ± 1.1	175.3 ± 25.2
2,450	10.0 ± 0.8	4.9	5.1	0.96	5.7 ± 0.4	96.5 ± 12.6	12.0 ± 1.3	165.5 ± 21.6
2,480	10.7 ± 0.9	5.6	5.1	1.10	4.5 ± 0.4	100.9 ± 16.1	11.6 ± 1.1	200.8 ± 28.9

The layering of rays (height in cells) is a highly variable parameter, yet showing sufficient stability in rays of a specific row number, and thus, can be used as an additional parameter in comparative anatomical studies [33]. In our material, no significant changes in layering at different altitudes from 1,400 to 2,480 masl have been detected. In single-rowed rays, the layering averages 4–6 cells (maximum 14), and in two- and three-rowed rays, the average is 10–13 cells (maximum 33).

The linear height of single-rowed rays fluctuates within the range of 22 to 255 μm, and for two- and three-rowed rays, from 40 to 563 μm. Table 3 shows the average values of the linear size of the rays by altitude. The differences in the average ray height between the individuals of the same habitat are more pronounced than those between the individuals from different locations at different altitudes above sea level. No significant changes in this parameter have been noted with an increase in the habitat altitude (correlation (r) 0.284 ± 0.041; t_r = 1.57).

Thus, the ray linear dimensions depend more on the height of the ray-composing cells than on the layering. For example, the measurement results show

that in depressed individuals at the upper habitat limits, the rays, especially the single-rowed ones, contain higher cells. In this case, the correlation ratio is represented by values of $r = 0.892 \pm 0.053$ with the measurement reliability of $t_r = 10.44$.

The specific volume of single-rowed and two- or three-rowed rays in mountain-ash wood is 10 and 12 %, respectively. The studied material showed that in the definitive xylem, two- and three-rowed rays most often occupy a larger volume. In samples taken from the upper habitat limits, the volume of single-rowed rays and their number are higher than in mountain ash wood from lower altitudes. No noticeable difference has been found in the volume of wider rays due to changes in the environmental factor under consideration.

A comparative anatomical analysis of the mountain ash wood taken from different altitudes above sea level indicates that any changes in it with increasing altitude are mainly quantitative in nature. The relationship between the characteristics of water-transporting, mechanical and storage elements is the closer the harsher the living conditions.

Table 4

The correlation (*r*) between the total number of rays and variously-rowed rays in the wood of *Sorbus aucuparia*

Altitude, masl	Quantity of rays	Single-rowed	Two-, three-rowed
1,400	Total	+0.632 ± 0.146	+0.557 ± 0.157
	Single-rowed	–	–0.284 ± 0.181
1,900	Total	+0.623 ± 0.148	+0.217 ± 0.184
	Single-rowed	–	–0.601 ± 0.151
2,450	Total	+0.459 ± 0.168	+0.388 ± 0.174
	Single-rowed	–	–0.644 ± 0.145
2,480	Total	+0.700 ± 0.135	+0.374 ± 0.175
	Single-rowed	–	–0.516 ± 0.162

The total density of rays at different heights depends more on the number of single-rowed than two- or three-rowed rays (Table 4). A comparison of the same annual increments of water-transporting elements (vessels) and storage elements (axial parenchyma cells) has not revealed any correlation them: springwood $r = 0.306 \pm 0.180$; $t_r = 1.70 < t_{table}$; summerwood $r = -0.091 \pm 0.162$; $t_r = 0.56$.

Conclusion

The results of the study of the adaptation of *Sorbus aucuparia* wood to various, including pessimal, habitat conditions due to the altitude above sea level in the mountains of the North Caucasus have shown that:

1. The basic response of mountain ash to the ascent in the mountains and the decrease in growth power, as well as to greater transpiration intensity, is a decrease in the size of the plant and narrowing of the annual increment of the stem in diameter. At the same time, the wood itself experiences a number of quantitative changes that are mainly aimed at optimizing the water-transporting function. With increasing altitude, as water supply conditions become more stringent, maintaining normal water balance is achieved by narrowing the vessel diameters and increasing their number per unit area. The increase in the total area of the pores occurs due to an increase in the

number of narrow, single vessels. The anatomical changes quantitatively established during the study are adaptive in nature.

2. In the storage parenchyma of wood, an increase in the density and linear dimensions of the rays has been observed. The volume of the radial parenchyma with a relatively constant average layering value occurs due to an increase in the height of the ray-composing cells.

From the above, it can be concluded that sufficient water balance and enrichment of *Sorbus aucuparia* wood with the living axial and radial parenchyma cells increases the viability and plasticity of the entire organism, covers the energy costs of reparative processes, and also stimulates the possibility of vegetative reproduction in conditions unfavourable for seed regeneration. A significant range of fluctuations in the quantitative characteristics of mountain ash wood elements increases its adaptive capabilities, helping it to occupy a variety of ecological niches in nature, as evidenced by the wide distribution area of this species.

REFERENCES

1. Belov A.A. Features of the Radial Wood Growth in the Weakened Pine-Bilberries of Bryansk Region Contaminated with Radionuclides. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2017, no. 1, pp. 42–51. (In Russ.). https://doi.org/10.24419/ILM.2017.1.5732

2. Bondarenko S.V. Flora and Vegetation of the Upper Mountain Belt of the Kabardino-Balkarian Reserve (Central Caucasus) and the Belaya River Basin (Western Caucasus). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki* = Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences, 2010, no. 5(159), pp. 75–78. (In Russ.).

3. Carlguist S. *Comparative Wood Anatomy: Systematic Ecological and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood* (*Springer Series in Wood Science*). Berlin, Springer Verlag, 1988. 436 p.

4. Chavchavadze E.S., Umarov M.U., Sizonenko O.Yu. Ways of Adaptation of Angiosperm Wood to the Conditions of Highlands and High Latitudes. *Wood Structure, Properties and Quality – 2004*: Proceedings of the 4th International Symposium. St. Petersburg, 2004, vol. 1, pp. 143–145. (In Russ.).

5. Chavchavadze E.S., Umarov M.U., Volkova S.B., Sizonenko O.Y. Ecological and Xylotomic Analysis of Woody Flowering Plants from Various Phytocenoses at the Eastern Regions of the North Caucasus. *Ustojchivoe razvitie gornykh territorij* = Sustainable Development of Mountain Territories, 2021, vol. 13, no. 4, pp. 544–557. (In Russ.). https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-4-544-557

6. Chavchavadze E.S. *Wood of Conifers*. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 169 p. (In Russ.).

7. Fritts H.C. *Tree Rings and Climate*. London, Academic Press, 1976. 567 p.

8. Galushko A.I. *Flora of the Western Part of the Central Caucasus* (*WCC*)*, its Analysis and Prospects for Use*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Leningrad, 1969. 42 p. (In Russ.).

9. Gvozdetskij A.N. *Karst Landscapes:* Study Guide. Moscow, 1979. 154 p. (In Russ.).

10. Kachalov A.A. *Trees and Shrubs.* Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970. 406 p. (In Russ.).

11. Kharzinov Z.Kh., Krapivina E.A., Shkhagapsoev S.Kh., Slonov T.L., Slonov L.Kh., Bashkur N.T. Biodiversity Analysis of the Chegem River Gorge (Central Caucasus). *Vestnik*

Akademii nauk Chechenskoj Respubliki = Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, 2013, no. 3(20), pp. 65–67. (In Russ.).

12. Kulagin Yu.Z. *Industrial Dendrology and Forecasting.* Moscow, 1985. 117 p. (In Russ.).

13. Leont'yev N.L. *Statistical Computing Techinques*. Moscow, 1966. 250 p. (In Russ.).

14. Lovelius N.V. *Dendroindication.* St. Petersburg, Petrovskaya Academy of Sciences and Arts, 2000. 313 p. (In Russ. and Eng.).

15. Lovelius N.V., D'yakonov K.N., Palchikov S.B., Retejum A.Ju., Rumyantsev D.E., Lipatkin V.A., Cherakshev A.V. Radial Growth of Scots Pine in Bog Sites of Russian Forest Area and Global Environmental Factors. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* = Society. Environment. Development, 2013, no. 4, pp. 251–259. (In Russ.).

16. Mamaev S.A. *Forms of Intraspecies Variability in Woody Plants*. Moscow, 1972. 282 p. (In Russ.).

17. Mazurkin P.M. *Dendrometry. Statistical Tree Science*: Tutorial. Part 1. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2003. 308 p. (In Russ.).

18. Metcalfe C.R., Chalk L. *Anatomy of the Dicotyledons. Vol. 2: Wood Structure and Conclusion of the General Introduction*. Oxford, 1983. 297 p.

19. Prozina M.N. *Botanical Microtechnics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1960. 206 p. (In Russ.).

20. Romanovskij M.G., Shchekalev R.V. *Forest and Climate of the Central Part of Russia*. Moscow, O-print Publ., 2009. 64 p. (In Russ.).

21. Romanovskij M.G., Shchekalev R.V. *Forest Plant Species Variation System*. Moscow: KMK Publ., 2014. 212 p. (In Russ.).

22. Rumyantsev D.E., Nikolaev D.K. Variability of Radial Growth in Relation to Variability of Linear and Volumetric Growth. *Dendrochronological Information in Forestry Research*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2007, pp. 82–101. (In Russ.).

23. Shchekalev R.V., Korchagov S.A., Danilov D.A., Melekhov V.I., Babich N.A., Antonov O.I., Gribov S.E., Zaytsev D.A. *Wood Science on a Silvicultural Basis*: Textbook. Moscow, KMK Publ., 2023. 381 p. (In Russ.).

24. Shchekalev R.V., Martynyuk A.A., Melekhov V.I. Variability Properties of *Pinus sylvestris* L. Wood in Growing Stock under Technogenic Impact. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 4, pp. 113–122. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-113-122

25. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. *Methods of Dendrochronology. Part 1. Fundamentals of Dendrochronology. Collection and Obtaining Tree-Ring Information:* Tutorial. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University Publ., 2000. 80 p. (In Russ.).

26. Schweingruber F.H. *Trees and Wood in Dendrochronology*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1993. 402 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77157-6

27. Svalov N.N. *Variational Statistics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 176 p. (In Russ.).

28. Tajsumov M.A. *Trees and Shrubs of the Chechen Republic*. Makhachkala, ALEF Publ., 2019. 306 p. (In Russ.).

29. *Trees of the North Caucasus*. Ed. by A.I. Galushko. Nalchik, 1967. 536 p. (In Russ.).

30. Umarov M.U., Chavchavadze E.S., Abubakarov A.D. Anatomical Features of Secondary Xylem of Woody Species of the Semi-Deserts of the Eastern Caucasus (Chechen Republic). *Vestnik MANEB* = Vestnik IAELPS, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 44–49.

31. Umarov M.U., Chavchavadze E.S. Anatomical Features of Wood of Some Species of the Genus *Rhamnus* (*Rhamnaceae*) from the the Armkhi River Gorge (Eastern Caucasus). *Botanicheskij zhurnal*, 1991, vol. 76, no. 3, pp. 395–399. (In Russ.).

32. Umarov M.U., Chavchavadze E.S. Strategy for Adaptation of Dicotyledonous Wood to High-Altitude Zone Conditions. *Vestnik kompleksnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. Kh.I. Ibragimova RAN* = Bulletin of the Integrated Research Institute. H.I. Ibragimova RAS, 2020, no. 4(4), pp. 128–139. (In Russ.).

33. Umarov M.A. *Ways of Adaptation of Water-Transporting Tissue of Woody and Shrubby Plants to Mountain Habitats*: Doc. Biol. Sci. Diss. Grozny, 1992. 317 p. (In Russ.).

34. Wheeler E.A., Baas P. Wood Identification – a Review. *IAWA Journal*, 1998, vol. 19(3), pp. 241–264. https://doi.org/10.1163/22941932-90001528

35. Yatsenko-Khmekevskij A.A. *Fundamentals and Methods of Anatomical Study of Wood*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1954. 338 p. (In Russ.).

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 582.632.1:581.321.1:577.115.3:581.543.2+581.543.5(470.22+571.56)
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-90-105

Жирнокислотный состав и активность ацил-липидных десатураз в почках березы повислой в зимне-весенний период в Карелии и Якутии

Л.В. Ветчинникова*[1]✉, *д-р биол. наук, гл. науч. сотр.; *ResearcherID: J-5665-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2091-905X*
А.Ф. Титов*[2], *чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, проф., гл. науч. сотр.;
ResearcherID: A-6705-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6880-2411
Т.Д. Татаринова*[3], *канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID: J-9072-2018, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3107-4342*
[1]Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; vetchin@krc.karelia.ru✉
[2]Институт биологии Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; titov@krc.karelia.ru
[3]Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, просп. Ленина, д. 41, г. Якутск, Россия, 677007; t.tatarinova@gmail.com

Поступила в редакцию 30.06.23 / Одобрена после рецензирования 28.09.23 / Принята к печати 30.09.23

Аннотация. Изучена динамика жирнокислотного состава и активности ацил-липидных десатураз, содержащихся в почках березы повислой *Betula pendula* Roth, места произрастания которой находятся в контрастных природно-климатических условиях: на одной широте – 62° с. ш., но удалены друг от друга более чем на 5 тыс. км в долготном направлении – 34° в. д. (окрестности г. Петрозаводска) и 130° в. д. (окрестности г. Якутска). Установлено, что независимо от места произрастания в зимне-весенний период суммарные липиды почек березы повислой характеризовались высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот. В то же время выявлены существенные различия по составу и соотношению моно-, ди-, триеновых жирных кислот, динамика которых в значительной степени зависела как от фазы зимне-весеннего развития растений, так и от степени континентальности климата. Показано, что в условиях Карелии во время вынужденного покоя (январь–март) в липидах почек березы повислой наблюдается повышенное содержание диеновых, а к началу их распускания (апрель–май) – триеновых жирных кислот, тогда как в Якутии в зимне-весенний период устойчиво преобладают моноеновые и диеновые жирные кислоты. Одновременно с этим выявлена высокая активность ω6- и ω3-десатураз (ответственных за синтез линолевой $C_{18:2}$ и линоленовой $C_{18:3}$ жирных кислот) в липидах почек березы повислой, произрастающей в Карелии, а ω9-десатуразы (катализирующей синтез олеиновой $C_{18:1}$ жирной кислоты) – в Якутии. Высказано предположение, что в условиях многолетней мерзлоты существует взаимосвязь между экспрессией генов, контролирующих образование ω9-ацил-липидной десатуразы, и устойчивостью тканей зачаточных органов в период их внутрипочечного развития к отрицательным температурам не только воздуха, но и корнеобитаемого слоя почвы. По мнению авторов, особенности, выявленные в составе суммарных липидов в почках березы повислой в Якутии по сравнению с Карелией, могут рассматриваться как один

© Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Татаринова Т.Д., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

из дополнительных механизмов, повышающих адаптивный потенциал вида в условиях многолетней мерзлоты и позволивший представителям рода *Betula* L. расширить ареал до северной границы распространения древесной растительности.
Ключевые слова: *Betula pendula* Roth, адаптация, десатуразы, жирные кислоты, суммарные липиды, Карелия, Якутия
Благодарности: Финансовое обеспечение исследования осуществлялось из средств федерального бюджета Российской Федерации на выполнение госзадания Карельского научного центра РАН (Институт леса КарНЦ РАН; № FMEN-2021-0018) и Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (№ FWRS-2021-0024). Авторы выражают глубокую благодарность В.В. Бубякиной, выступившей инициатором проведения исследований березы в условиях Карелии и Якутии, А.А. Перку, А.Г. Пономареву, И.В. Васильевой, О.С. Серебряковой и Н.Е. Петровой за помощь в сборе растительного материала, а также И.В. Морозовой за частичную обработку первичных данных. Анализ липидов выполнен с использованием экспериментальной базы ЦКП «Аналитическая лаборатория» Института леса КарНЦ РАН.

Для цитирования: Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Татаринова Т.Д. Жирнокислотный состав и активность ацил-липидных десатураз в почках березы повислой в зимне-весенний период в Карелии и Якутии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 90–105. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-90-105

Original article

The Fatty Acid Composition and the Activity of Acyl-Lipid Desaturases in the Buds of Silver Birch in Winter-Spring Period in Karelia and Yakutia

Lidia V. Vetchinnikova[1]✉***,*** *Doctor of Biology, Chief Research Scientist; ResearcherID: J-5665-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2091-905X*
Alexander F. Titov[2]***,*** *Corresp. Member of RAS, Doctor of Biology, Prof., Chief Research Scientist; ResearcherID: A-6705-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6880-2411*
Tatiana D. Tatarinova[3]***,*** *Candidate of Biology, Senior Research Scientist; ResearcherID: J-9072-2018, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3107-4342*
[1]Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; vetchin@krc.karelia.ru✉
[2]Institute of Biology of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; titov@krc.karelia.ru
[3]Institute of Biological Problems of the Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Lenina, 41, Yakutsk, 677007, Russian Federation; t.tatarinova@gmail.com

Received on June 30, 2023 / Approved after reviewing on September 28, 2023 / Accepted on September 30, 2023

Abstract. The dynamics of the fatty acid composition and activity of acyl-lipid desaturases contained in the buds of silver birch *Betula pendula* Roth have been studied. The places of growth of this tree are located in contrasting natural and climatic conditions: at the same latitude – 62° N, but are separated from each other by more than 5 thousand km in the longitudinal direction – 34° E (the vicinity of Petrozavodsk) and 130° E (the vicinity of Yakutsk). It has been found that, regardless of the place of growth, in the spring-winter period, the total lipids

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

of the buds of silver birch have been characterized by a high content of unsaturated fatty acids. At the same time, significant differences have been revealed in the composition of mono-, di- and trienoic fatty acids, the dynamics of which have largely depended on both the phase of winter-spring plant development and the degree of continentality of the climate. It has been shown that in Karelia, during the exogenous dormancy period (January–March), an increased content of dienoic fatty acids is observed in the lipids of the buds of silver birch, and by the beginning of their breaking (April–May) – trienoic fatty acids, whereas in Yakutia in the winter-spring period monoenoic and dienoic fatty acids steadily prevail. At the same time, a high activity of ω6- and ω3-desaturases (responsible for the synthesis of linoleic $C_{18:2}$ and $C_{18:3}$ fatty acids) has been detected in the lipids of the buds of silver birch growing in Karelia, and ω9-desaturase (catalyzing the synthesis of oleic $C_{18:1}$ fatty acid) in Yakutia. It has been suggested that in permafrost conditions there is a relationship between the expression of genes controlling the formation of ω9-acyl-lipid desaturase and the resistance of the tissues of primordial organs during their intra-bud development to negative temperatures not only of the air, but also of the root-inhabited soil layer. The authors believe that the features identified in the composition of total lipids in the buds of silver birch in Yakutia compared to Karelia can be considered as one of the additional mechanisms that increase the adaptive potential of the species in permafrost conditions and allowing the representatives of the genus *Betula* L. to expand their area to the northern limit of the distribution of woody vegetation.
Keywords: *Betula pendula* Roth, adaptation, desaturases, fatty acids, total lipids, Karelia, Yakutia
Acknowledgements: The research was funded from the federal budget under the state assignment to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences; no. FMEN-2021-0018) and the Institute of Biological Problems of the Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (no. FWRS-2021-0024). The authors are deeply grateful to V.V. Bubyakina, who initiated the research on birch in Karelia and Yakutia, to A.A. Perk, A.G. Ponomarev, I.V. Vasilyeva, O.S. Serebryakova and N.E. Petrova for assistance in collecting plant material in Yakutia and Karelia, and to I.V. Morozova for partial processing of the primary data. The lipid analysis was carried out using the equipment of the Core Facility “Analytical Laboratory” of the Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Tatarinova T.D. The Fatty Acid Composition and the Activity of Acyl-Lipid Desaturases in the Buds of Silver Birch in Winter-Spring Period in Karelia and Yakutia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 90–105. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-90-105

Введение

Среди многочисленных факторов внешней среды, оказывающих влияние на жизнедеятельность растений, 1-е место занимают климатические, основными из которых являются температура, свет и влажность. Но температура, в отличие от других, – постоянно действующий и всепроникающий фактор, который уже в силу этого имеет огромное влияние на все стороны жизнедеятельности организмов [12, 32]. Растения, ведущие прикрепленный образ жизни и не способные поддерживать на постоянном уровне собственную температуру, особенно зависят от данного фактора. Именно температурные условия во многом определяют границы ареалов дикорастущих и культурных растений, а также (наряду со светом) сроки начала и/или окончания их активной вегетации в естественных условиях. Кроме того, по мере продвижения на север температура все

более выступает как фактор, ограничивающий видовое разнообразие растений и возможность выращивания тех или иных сельскохозяйственных культур. Не являются исключением и древесные растения [31], крона которых в отличие от травянистых не имеет в зимний период защиты в виде снежного покрова.

Одним из основных компонентов лесных экосистем бореальной зоны, сформировавшихся на территории Евразии, являются белые березы (род *Betula* L., секция Albae). Они образуют чистые насаждения или входят в состав смешанных лесов, поднимаются высоко в горы, участвуют в формировании северной и южной границ произрастания древесной растительности. Поэтому представляет большой интерес вопрос о том, какие именно защитно-приспособительные механизмы определяют высокий адаптационный потенциал вида. Один из них может быть связан с особенностями жирнокислотного (ЖК) состава липидов [29, 35]. Так, с участием специфических ферментов (ацил-липидных десатураз) происходит увеличение степени ненасыщенности липидов, что влечет за собой более рыхлую упаковку в липидном бислое мембран, улучшая условия их функционирования за счет повышения пластичности и текучести [7, 27]. Кроме того, ЖК входят в состав не только структурных, но и запасных липидов, выступая в определенных случаях в качестве основного источника энергии для обеспечения метаболических процессов в ходе роста и развития растений.

Цель данной работы – изучение ЖК-состава и активности десатураз суммарных липидов в почках березы повислой в период ее зимне-весеннего развития в контрастных по природно-климатическим условиям Карелии и Якутии.

Объекты и методы исследования

Объектом изучения были 30–40-летние деревья березы повислой *Betula pendula* Roth, произрастающие на территории Республики Карелии и Республики Саха (Якутия). Места сбора образцов располагаются на одной широте – 62° с. ш., но удалены друг от друга в долготном направлении – 34° в. д. для окрестностей г. Петрозаводска и 130° в. д. для окрестностей г. Якутска – более чем на 5 тыс. км, что определяет значительные различия территорий по природно-климатическим условиям. Карелия относится к зоне умеренно континентального климата с переходом к морскому. Средняя температура января составляет от –4 до –13 °С, июля – от +12 до +22 °С, осадки – около 500 мм в год (рис. 1). Климат Центральной Якутии – резко континентальный. Средняя температура января – от –35 до –50 °С, а в отдельные годы в разных районах республики – до –60 °С и ниже (зима без возвратных потеплений), июля – от +20 до +36 °С. Средняя дневная температура воздуха, превышающая +5 °С, устанавливается только к середине мая, а ночные заморозки продолжаются до конца месяца, в результате суточные перепады температуры могут достигать 20 °С. Годовая сумма осадков – 230–270 мм. Дополнительным лимитирующим фактором для растений на территории Якутии является многолетняя мерзлота (криолитозона). Климатические показатели в период сбора образцов в целом не отличались от среднемноголетних.

Материалом для исследования служили почки деревьев, несущие только зачаточные органы вегетативных побегов (ауксибласты или брахибласты, соответственно удлиненные или укороченные побеги) и/или вместе с генеративными (женские соцветия), сбор которых проводили индивидуально с 3 (одних и тех

же в каждом регионе) деревьев в зимне-весенний период (с января по май), когда жизнедеятельность растений (от вынужденного покоя до начала распускания почек) напрямую зависела от действия факторов внешней среды и в первую очередь температуры. В каждой биологической повторности (пробе) делалось по 3–5 химических повторностей.

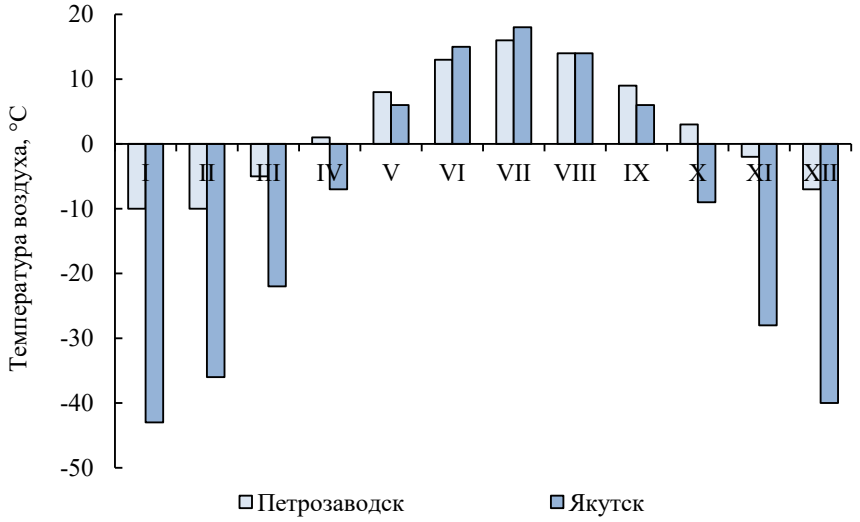


Рис. 1. Изменение температуры воздуха (средние многолетние данные) по месяцам в окрестностях г. Петрозаводска и г. Якутска

Fig. 1. The change in air temperature (long-term average data) by month in the vicinity of Petrozavodsk and Yakutsk

Для экстракции липидов из почек (0,5 г сухой массы) использовали смесь хлороформа и метанола (2:1 по объему) с добавлением воды. Метиловые эфиры ЖК получали в результате переэтерификации липидов метанолом в присутствии ацетилхлорида и анализировали на газожидкостном хроматографе «Хроматэк – Кристалл-5000 М.1» (Йошкар-Ола, Россия) с использованием капиллярной колонки HP-INNOWAX (50 м × 0,32 мм) при температурах (°С): термостата – 180 (изотерма), пламенно-ионизационного детектора – 240 и испарителя – 220, а также при скорости газа-носителя (азот) – 50 мл/мин. ЖК идентифицировали сравнением времени удерживания со стандартными ЖК (Supelko 37 component Fame Mix), а также сопоставлением эквивалентной длины цепи экспериментально полученных компонентов с известными данными. Количественное определение ЖК проводили методом внутреннего стандарта (маргариновая кислота). Вычисляли содержание индивидуальных ЖК, а также их групп, объединенных по числу двойных связей в углеродной цепочке: насыщенные (двойные связи отсутствуют) и ненасыщенные (моно-, ди-, триеновые).

Коэффициент ненасыщенности ЖК (соотношение ненасыщенные/насыщенные ЖК) U/S (unsaturated/saturated) и индекс двойной связи DBI (double bond index) рассчитывали по формулам [25]:

$$U/S = \Sigma U/\Sigma S;$$

$$DBI = \Sigma P_i n_i/100,$$

где P_i – доля i-й ЖК, %; n_i – количество двойных связей в i-й ЖК.

Об активности ω9-, ω6- и ω3-ацил-липидных десатураз, катализирующих введение двойных связей в углеродные цепи, косвенно судили по индексам, рассчитанным на основании содержания (% от суммы ЖК) отдельных компонентов ЖК типа C_{18} по следующим формулам:

$$SDR = C_{18:1} / (C_{18:0} + C_{18:1});$$
$$ODR = (C_{18:2} + C_{18:3}) / (C_{18:1} + C_{18:2} + C_{18:3});$$
$$LDR = C_{18:3} / (C_{18:2} + C_{18:3}),$$

где SDR, ODR, LDR – стеароил- (stearoyl-desaturase ratio), олеоил- (oleoyl-desaturase ratio) и линолеил-десатуразные (linoleoyl-desaturase ratio) отношения соответственно; $C_{18:0}$, $C_{18:1}$, $C_{18:2}$, $C_{18:3}$ – содержание стеариновой, олеиновой, линолевой и линоленовой ЖК соответственно, %.

Относительное содержание воды в почках березы повислой оценивали после высушивания их тканей при температуре 105 °С до постоянных значений и вычисляли по формуле: ((А − Б) / А)·100 %, где А, Б – сырая и абсолютно сухая массы соответственно.

Обработку данных проводили общепринятыми методами с привлечением статистического пакета Microsoft Office Excel 2010. В статье обсуждаются только величины, которые являются статистически достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование показало, что в суммарных липидах почек березы повислой в зимне-весенний период в условиях Карелии содержалось от 9 до 12 насыщенных и ненасыщенных ЖК, а в условиях Якутии – от 10 до 16. Их максимальное количество отмечали в период вынужденного покоя (январь–март), когда температура воздуха устойчиво была ниже 0 °С. С повышением температуры в апреле число ЖК уменьшилось до 11 независимо от места произрастания берез, а в мае достигло минимума (9 и 10 в Карелии и Якутии соответственно). Значительные различия обнаружены в соотношении ЖК в зависимости от места произрастания растений и фазы их развития. Так, среди насыщенных ЖК в липидах преобладала пальмитиновая кислота ($C_{16:0}$), содержание которой увеличивалось в течение зимне-весеннего периода, но в условиях Карелии в мае ее было в 2–3 раза больше по сравнению с Якутией (20,87 и 9,11 % от суммы ЖК, или 9,31 и 2,67 мг/г соответственно). Стеариновая ЖК ($C_{18:0}$) в период вынужденного покоя растений зафиксирована в следовых количествах независимо от места произрастания дерева, но в апреле и мае в условиях Якутии данной ЖК было 2,7 % от суммы ЖК, что почти в 2 раза выше, чем в Карелии.

Ненасыщенные ЖК в липидах почек березы повислой характеризовались наличием 16 и 18 атомов углерода с разным числом двойных связей, при этом в Карелии преобладали линолевая ($C_{18:2}$) и линоленовая ($C_{18:3}$) ЖК. В Якутии ненасыщенные ЖК оказались более разнообразными за счет изомеров C_{18}, которые устойчиво воспроизводились в биологических повторностях, однако их идентификация требует проведения специальных исследований. В целом в липидах почек березы повислой преобладали ненасыщенные ЖК, сумма которых варьировала от 75 до 88 % в условиях Карелии и от 85 до 91 % – в Якутии, снижаясь от января (вынужденный покой) к маю (начало распускания почек).

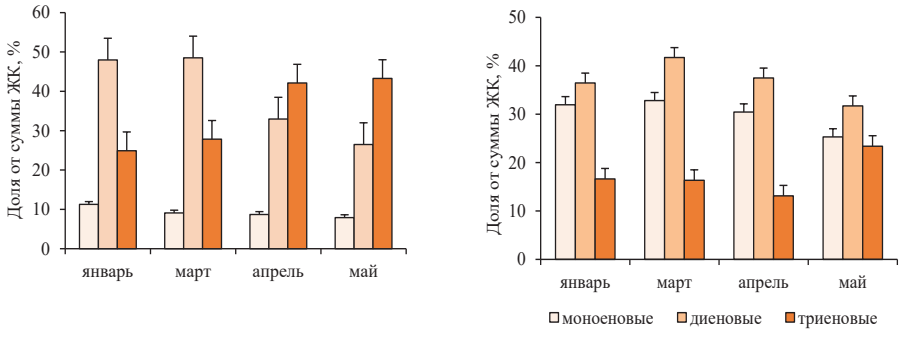
Уменьшение уровня ненасыщенных ЖК и увеличение содержания насыщенных в суммарных липидах почек березы повислой в течение зимне-весеннего периода отразилось и на показателях U/S и DBI. В частности, первый из них был выше в условиях Якутии (в 2 раза), а второй, наоборот, в Карелии (на 10 %) (табл. 1). При этом независимо от места произрастания в период от зимы к весне их изменения носили противоположную направленность: U/S снижался (~ в 1,5 раза), а DBI – немного повышался (~ в 1,1 раза), хотя по значениям оставался в более узком диапазоне по сравнению с U/S.

Таблица 1

Коэффициенты ненасыщенности ЖК и индексы двойной связи липидов почек березы повислой, произрастающей в условиях Карелии и Якутии, по месяцам
The unsaturated coefficients of the fatty acids and the double bond indices of lipids in the buds of silver birch growing in Karelia and Yakutia, by month

Место произрастания	Январь–февраль		Март		Апрель		Май	
	U/S	DBI	U/S	DBI	U/S	DBI	U/S	DBI
Карелия	5,28	2,16	5,85	2,22	5,78	2,37	3,48	2,46
Якутия	9,68	1,93	12,39	1,85	9,12	1,97	7,53	2,12

Существенные различия в суммарных липидах почек березы повислой выявлены по составу моно-, ди-, триеновых ЖК и их соотношению, которые в значительной мере зависели как от степени континентальности климата, так и от фазы зимне-весеннего развития растений. Например, в условиях Карелии преобладали диеновые (от 26,5 до 48,5 %) и триеновые (24,9 до 43,3 %) ЖК (рис. 2, *а*), но в период вынужденного покоя почти в 2 раза выше была доля диеновых, затем с началом сокодвижения (конец марта – начало апреля) они почти сравнялись с триеновыми ЖК, а к началу вегетации (май) триеновые превысили диеновые в 1,6 раза. Содержание моноеновых ЖК в условиях Карелии оставалось относительно стабильным, хотя с января по май отмечена тенденция к их снижению (с 11,3 до 7,9 %). В составе суммарных липидов почек березы повислой в условиях Якутии преобладали моноеновые (от 30,5 до 32,8 %) и диеновые (от 36,4 до 41,7 %) ЖК (рис. 2, *б*). Однако в мае их содержание снизилось, а моноеновые (25,3 %) почти сравнялись с триеновыми (23,4 %) ЖК.

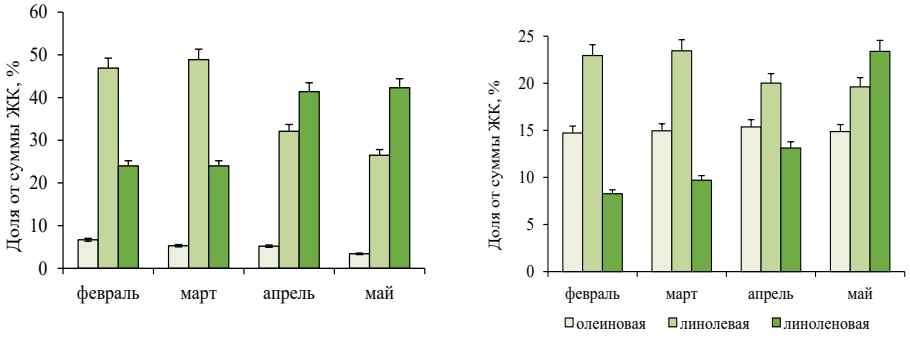


а *б*

Рис. 2. Содержание моно-, ди- и триеновых ЖК в суммарных липидах почек березы повислой в зимне-весенний период в условиях Карелии (*а*) и Якутии (*б*)

Fig. 2. The content of mono-, di- and trienoic fatty acids in the total lipids of silver birch buds in the winter-spring period in Karelia (*a*) and in Yakutia (*б*)

Анализ состава ЖК и их динамики в отдельных группах показал следующее. В условиях Карелии в период отрицательных температур (январь–март) в липидах почек березы повислой среди диеновых ЖК преобладала линолевая (около 47 %), а среди триеновых – линоленовая (около 24 %) (рис. 3, *а*). Повышение температуры воздуха (апрель–май) повлекло за собой увеличение количества линоленовой ЖК (до 42,3 %) на фоне снижения линолевой (26,5 %). Основной ЖК среди моноеновых была олеиновая (6,7 %), доля которой к весне уменьшилась в 2 раза.



а *б*

Рис. 3. Содержание олеиновой, линолевой и линоленовой ЖК в липидах почек березы повислой в зимне-весенний период в условиях Карелии (*а*) и Якутии (*б*)

Fig. 3. The content of oleic, linoleic and linolenic fatty acids in the lipids of silver birch buds in the winter-spring period in Karelia (*а*) and in Yakutia (*б*)

В условиях Якутии наблюдалась иная картина. Концентрация олеиновой ЖК (около 15 %) здесь была в 2 раза больше по сравнению с Карелией, такое превышение сохранялось в течение всего периода исследования (рис. 3, *б*). Среди диеновых ЖК преобладала линолевая, доля которой снизилась с февраля по апрель (с 22,9 до 19,6 %). Количество триеновых ЖК, представленных в основном линоленовой, наоборот, с февраля по март существенно увеличилось (с 8,3 до 23,4 %), но даже в мае их было значительно меньше, чем в Карелии.

Сравнительный анализ активности ω9-ацил-липидной десатуразы показал, что индекс SDR находился на довольно высоком уровне в липидах почек березы повислой независимо от места ее произрастания (табл. 2). В условиях Карелии его значения варьировали от 0,80 до 0,83 с января по апрель, снижаясь до 0,76 в мае. В Якутии динамика была сходной, но индекс SDR оказался немного выше даже в весенний период (0,85). По мере зимне-весеннего развития растений наблюдалось увеличение индекса ODR, но он был существенно выше в Карелии (от 0,91 до 0,95), чем в Якутии (от 0,68 до 0,74). Активность ω3-ацил-липидной десатуразы в липидах почек березы повислой по мере их зимне-весеннего развития увеличилась в 2 раза, однако значения LDR характеризовались как наименьшие и варьировали от 0,34 до 0,61 и от 0,26 до 0,54 в Карелии и Якутии соответственно.

Основными факторами окружающей среды, на которые реагируют лиственные древесные растения, приспосабливаясь к сезонным изменениям в годичном цикле в высоких широтах, являются температура и фотопериод [15, 26]. Именно ими в значительной степени определяются накопление запасных пита-

тельных веществ в тканях ствола, прекращение линейного и радиального роста, листопад и переход в состояние покоя, наблюдаемые осенью [18, 21, 34], а начало вегетации в весенний период – главным образом температурой [17].

Таблица 2

Расчетные индексы, отражающие изменение активности ω9- (SDR), ω6- (ODR) и ω3- (LDR) десатураз в липидах почек березы повислой, произрастающей в условиях Карелии и Якутии, по месяцам
The calculated indices reflecting the change in the activity of ω9- (SDR), ω6- (ODR) and ω3- (LDR) desaturases in the lipids of the buds of silver birch growing in Karelia and Yakutia, by month

Индекс	Январь–февраль		Март		Апрель		Май	
	Карелия	Якутия	Карелия	Якутия	Карелия	Якутия	Карелия	Якутия
SDR	0,80	0,89	0,81	0,96	0,83	0,85	0,76	0,85
ODR	0,91	0,68	0,93	0,69	0,92	0,68	0,95	0,74
LDR	0,34	0,26	0,34	0,29	0,51	0,40	0,61	0,54

В настоящей работе изучение ЖК-состава и активности ацил-липидных десатураз суммарных липидов, содержащихся в почках березы повислой, проводили в зимне-весенний период. Места ее произрастания – Карелия и Якутия различаются по погодно-климатическим условиям, но характеризуются одинаковой продолжительностью фотопериода. Логично полагать, что окончание периода покоя и весеннее развитие изученных растений здесь определяются именно температурой. Например, распускание почек и формирование листовой поверхности у березы повислой в Карелии происходит примерно в середине мая (рис. 4, *а*), а в Якутии – в более поздние сроки (рис. 4, *б*), что, скорее всего, обусловлено резкими суточными перепадами температуры воздуха в весенний период и отрицательной температурой корнеобитаемого слоя почвы, наблюдаемых в условиях многолетней мерзлоты.

Как уже отмечалось, среди механизмов адаптации растений к отрицательным температурам важная роль отводится увеличению уровня ненасыщенности ЖК-состава липидов в клеточных мембранах [7, 8, 33]. Нами показано, что независимо от места произрастания березы повислой – в Карелии или Якутии – в липидах их почек ненасыщенные ЖК преобладают над насыщенными, что говорит о высоком потенциале устойчивости первых к отрицательным температурам не только в зимний, но и в весенний период вплоть до начала распускания почек (в мае). При этом в условиях Якутии липиды почек характеризовались более высокими суммой ненасыщенных ЖК и, соответственно, коэффициентом их ненасыщенности, но индекс DBI здесь оказался ниже. Возможно, это обусловлено большой концентрацией в липидах моноеновых ЖК по сравнению с триеновыми, а также пониженным в 2 раза содержанием пальмитиновой ЖК.

Наличие в липидах линолевой ЖК, которая имеет 2 двойные связи в углеродной цепи, также является важным условием для формирования текучести мембран [7]. В липидах почек березы повислой, произрастающей в высоких широтах, ее максимальная концентрация (47 и 23 % в Карелии и Якутии соответственно) была зафиксирована в период действия наиболее низких отрицательных температур воздуха, когда растения находились в состоянии вынуж-

денного покоя. Повышение температуры в весенний период повлекло за собой снижение уровня линолевой ЖК (в 1,8 и 1,2 раза в условиях Карелии и Якутии соответственно) на фоне увеличения содержания линоленовой ЖК, для синтеза которой первая из названых является субстратом. Следует также отметить, что в Карелии рост доли линоленовой ЖК в липидах почек березы повислой произошел в 1-й декаде апреля, а в условиях Якутии – только в начале мая, когда среднесуточная температура воздуха перешла через 0 °С. Большее накопление этой ЖК к началу вегетации, что особенно заметно проявилось в гликолипидах [5], может свидетельствовать в пользу активного формирования мембран хлоропластов зачаточных листьев в период их внутрипочечного развития. Как правило, линоленовая ЖК снижает вязкость липидного бислоя тилакоидных мембран, способствуя тем самым ускорению электронного транспорта в хлоропластах (включая фотосистемы ФСII и ФСI) [19]. Важная роль в изменении ЖК-состава липидов отводится также аттрагирующей способности зачаточных листьев в период их внутрипочечного развития [4, 20], поскольку экспортером фотоассимилятов листа березы становится только при достижении 20 % от ее общей площади [14].

а *б*

Рис. 4. Береза повислая, произрастающая в Карелии (*а*) и Якутии (*б*), 16.05.2023 г.

Fig. 4. The silver birch trees growing in Karelia (*а*) and Yakutia (*б*), 16.05.2023

Регулирование физических свойств мембран осуществляется растительной клеткой посредством изменения количества двойных связей, за формирование которых в липидах отвечают десатуразы ЖК (FAD – fatty acid desaturase), обеспечивающие появление таких связей в определенных положениях углеродных цепей, преобразовывая тем самым насыщенные ЖК в нена-

сыщенные [2, 7]. Появление 2-й и 3-й двойных связей в ненасыщенных ЖК с 18 углеродными атомами в хлоропластных мембранах происходит с участием ω6- (FAD5 и FAD6) и ω3-ацил-липидных (FAD7 и FAD8) десатураз [28, 30].

В зимне-весенний период в суммарных липидах почек березы повислой наблюдали высокую активность ω9-десатуразы (SDR), снижение которой отмечали только к началу распускания почек (в мае), но более высокой она оставалась в Якутии. По всей вероятности, в условиях многолетней мерзлоты в липидах почек березы повислой взаимосвязь между экспрессией генов ω9-ацил-липидной десатуразы и устойчивостью тканей к низкой отрицательной температуре выше по сравнению с Карелией. Преобладание моноеновых ЖК в липидах в условиях Якутии представляется закономерным, поскольку, наряду с другими функциями, они участвуют в передаче сигналов, регулирующих более продолжительные здесь, чем в Карелии, процессы клеточной дифференцировки [10] зачаточных органов вегетативных и/или генеративных побегов. Это обусловлено тем, что в условиях многолетней мерзлоты замедленное оттаивание почвы сдерживает начало деятельности корневой системы и вегетации растений в целом.

Анализ индексов ODR и LDR показал, что в условиях Карелии в липидах почек березы повислой активность ω6-ацил-липидной десатуразы по сравнению с ω3 была выше в 2,7 раза в период вынужденного покоя (январь–март). Весной, с началом распускания почек, экспрессия генов ω3-ацил-липидной десатуразы, очевидно, усилилась, о чем свидетельствовало повышение LDR в 1,8 раза, а уровня линоленовой ЖК – в 1,5 раза. В условиях Якутии эти показатели имели сходную динамику, но их значения были заметно ниже. Рост активности ω3-ацил-липидных десатураз (LDR) независимо от места произрастания берез начался уже в апреле, а в мае по сравнению с зимними месяцами она выросла в 2 раза. Увеличение содержания линоленовой ЖК в ранневесенний период (март) обнаружено в суммарных липидах хвои ели сибирской *Picea obovata* в условиях Восточной Сибири, что, по мнению авторов [6], обусловлено усилением экспрессии генов FAD7 и FAD8 пластидной ω3-ацил-липидной десатуразы, участвующей в биосинтезе линоленовой кислоты, на фоне повышения температуры воздуха. Наблюдаемое в весенний период (особенно к началу вегетации) уменьшение доли линолевой ЖК в суммарных липидах почек березы повислой, по-видимому, также обусловлено снижением активности гена FAD6 в хлоропластах зачаточных листьев в связи с изменением температуры воздуха. Важнейшей десатуразой в нефотосинтезирующих тканях высших растений является FAD2, которая локализована в эндоплазматическом ретикулуме и катализирует образование 2-й двойной связи в моноеновых ЖК [16]. Избирательность действия десатураз, скорее всего, обусловлена особенностями формирования мембран хлоропластов зачаточных листьев в период их внутрипочечного развития в весенний период, направленными на повышение устойчивости листьев к действию резких перепадов суточных температур, которые в Якутии наблюдаются до конца мая [8, 9, 22].

В целом полученные нами результаты хорошо согласуются с общепринятой точкой зрения о том, что накопление ненасыщенных ЖК в составе липидов является одним из важных механизмов, обеспечивающих высокую устойчивость растений к отрицательным температурам. Однако определенные

различия выявлены в липидах почек березы повислой, произрастающей на одной широте, но в контрастных природно-климатических условиях, поскольку изучаемые территории удалены друг от друга в долготном направлении. В частности, в условиях Якутии, где в зимний период наблюдается экстремально низкая температура воздуха, в суммарных липидах березы повислой среди ненасыщенных ЖК преобладают олеиновая и линолевая, тогда как в Карелии – линолевая и линоленовая. Возможно, это связано с тем, что фазовый переход липидов от гелеобразного состояния к жидкокристаллическому происходит при температуре, напрямую зависящей от оводненности тканей. Так, у сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в условиях Сибири при допустимом уровне обезвоживания структура биомембран в клетках сохраняется в упорядоченном состоянии до –40 °C [1]. Береза также способна выживать, существенно снижая содержание воды в тканях (до 80 %), тогда как, например, озимые злаки менее устойчивы к действию низких температур при обезвоживании (не более 50 %) [13]. Согласно нашим данным, в условиях Якутии в период вынужденного покоя (февраль–апрель) содержание воды в почках березы повислой составило чуть более 30 %, а к началу их распускания (май) существенно увеличилось – до 60 % и выше.

Обычно снижение содержания воды в тканях происходит в период осенней подготовки древесных растений к глубокому покою, что способствует возникновению сигнала, индуцирующего экспрессию генов, участвующих в других биохимических механизмах защиты клеток [23]. Например, в условиях Якутии в зимний период в почках березы повислой синтезируются стрессовые белки-дегидрины, которые принимают участие в осмо- и криозащитных механизмах при низкотемпературной адаптации древесных растений и могут использоваться даже в качестве косвенных маркеров морозоустойчивости растений [3, 9, 11, 24]. Добавим, что, согласно полученным нами данным, уровень ненасыщенных ЖК и индекс U/S в условиях Якутии были максимальными (92,5 и 12,4 % соответственно) только в марте, когда температура воздуха поднималась до тех значений (в среднем около –20 °C), которые характерны для европейской части ареала березы повислой в зимний период. Очевидно, что на ЖК-состав липидов вегетативных почек березы определяющее влияние оказывают погодные условия, прежде всего температура. Поэтому независимо от места произрастания содержание линоленовой кислоты (как в абсолютных, так и в относительных единицах) в почках березы повислой положительно коррелирует с температурой воздуха, а коэффициент корреляции (по Спирмену) в обоих случаях соответствует 1 (при $p \leq 0,95$).

Заключение

Результаты исследования позволили выявить как сходство, так и ряд различий в жирнокислотном составе и активности ацил-липидных десатураз в почках березы повислой, места произрастания которой находятся в контрастных по природно-климатическим условиям Карелии и Якутии. Установлено, что независимо от места произрастания суммарные липиды характеризуются высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот, что способствует адаптации растений к отрицательным температурам в зимне-весенний период. В то же время выявлены существенные различия по составу и соотношению моно-,

ди-, триеновых жирных кислот, динамика которых в значительной степени зависит как от фазы зимне-весеннего развития растений, так и от степени континентальности климата. Показано, что в условиях Карелии в период вынужденного покоя (январь–март) в липидах почек березы повислой наблюдается повышенное содержание диеновых, а к началу их распускания (апрель–май) – триеновых жирных кислот, что сопровождается снижением индекса ненасыщенности жирных кислот и увеличением индекса двойной связи. В условиях Якутии в зимне-весенний период устойчиво преобладают моноеновые и диеновые жирные кислоты. Одновременно с этим выявлена высокая активность ω6- и ω3-десатураз (ответственных за синтез линолевой $C_{18:2}$ и линоленовой $C_{18:3}$ жирных кислот) в липидах почек березы повислой, произрастающей в Карелии, а ω9-десатуразы (катализирующей синтез олеиновой $C_{18:1}$ жирных кислот) – в Якутии. Высказано предположение, что в условиях многолетней мерзлоты существует взаимосвязь между экспрессией генов, контролирующих образование ω9-ацил-липидной десатуразы, и устойчивостью тканей зачаточных органов в период их внутрипочечного развития к отрицательным температурам не только воздуха, но и корнеобитаемого слоя почвы. Некоторые особенности (преобладание моно- и диеновых жирных кислот, повышенный уровень активности ω9-десатуразы и др.), выявленные в составе липидов в почках березы повислой в условиях многолетней мерзлоты, очевидно, определяются действием природно-климатических факторов места ее произрастания и могут рассматриваться как один из дополнительных механизмов, повышающих адаптивный потенциал березы повислой к отрицательным температурам не только воздуха, но и корнеобитаемого слоя почвы, позволивший представителям рода *Betula* L. расширить ареал до северной границы распространения древесной растительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Алаудинова Е.В., Симкина С.Ю., Миронов П.В.* Сезонные изменения содержания воды в меристематических тканях почек *Picea obobata* L. и *Pinus sylvestris* L. и ее распределение в клетках // Хвойные бореал. зоны. 2007. Т. XXIV, № 4–5. С. 487–491.

Alaudinova E.V., Simkina S.Yu., Mironov P.V. Seasonal Changes in Water Content in Meristematic Tissues of *Picea obovata* L. and *Pinus sylvestris* L. Buds and its Subcellular Distribution. *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2007, vol. 24, no. 4–5, pp. 487–491. (In Russ.).

2. *Берестовой М.А., Павленко О.С., Голденкова-Павлова И.В.* Десатуразы жирных кислот растений: роль в жизнедеятельности растений и биотехнологический потенциал // Успехи соврем. биологии. 2019. Т. 139, № 4. С. 338–351.

Berestovoy M.A., Pavlenko O.S., Goldenkova-Pavlova I.V. Plant Fatty Acid Desaturases: Role in the Life of Plants and Biotechnological Potential. *Uspekhi sovremennoj biologii* = Biology Bulletin Reviews, 2019, vol. 139, no. 4, pp. 338–351. (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S0042132419040045

3. *Бубякина В.В., Татаринова Т.Д., Пономарев А.Г., Перк А.А., Соломонов Н.Г.* Особенности сезонной динамики дегидринов *Betula platyphylla* Sukacz., ассоциированные с формированием морозоустойчивости в условиях криолитозоны // Докл. акад. наук. 2011. Т. 439, № 6. С. 844–847.

Bubyakina V.V., Tatarinova T.D., Ponomarev A.G., Perk A.A., Solomonov N.G. Characteristics of Seasonal Dynamics of *Betula platyphylla* Sukacz. Dehydrins Associated with Frost Hardiness Development under the Cryolitic Zone Conditions. *Doklady*

akademii nauk = Doklady Biological Sciences, 2011, vol. 439, pp. 258–261. (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S0012496611040193

4. *Венжик Ю.В., Титов А.Ф., Таланова В.В.* Кратковременное охлаждение проростков или корней пшеницы вызывает изменения в ультраструктуре клеток мезофилла листа // Тр. Карел. науч. центра Рос. акад. наук. 2017. № 5. С. 66–78.

Venzhik Yu.V., Titov A.F., Talanova V.V. Short-Term Chilling of Wheat Seedlings or Roots Affects the Ultrastructure of Mesophyll Cells. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Transactions of KarRC RAS, 2017, no. 5, pp. 66–78. (In Russ.). https://doi.org/10.17076/eb516

5. *Ветчинникова Л.В., Татаринова Т.Д., Серебрякова О.С., Перк А.А., Пономарев А.Г., Ильинова М.К., Петрова Н.Е., Васильева И.В.* Жирнокислотный состав мембранных липидов в почках березы повислой в зимне-весенний период в условиях криолитозоны // Цитология. 2019. Т. 61, № 5. С. 412–424. https://doi.org/10.1134/S0041377119050079

Vetchinnikova L.V., Tatarinova T.D., Serebryakova O.S., Perk A.A., Ponomarev A.G., Il'inova M.K., Petrova N.E., Vasilieva I.V. The Fatty Acid Composition of Membrane Lipids in Buds of Silver Birch during the Winter-Spring Period under the Conditions of the Cryolithozone. *Tsitologiya* = Cell and Tissue Biology, 2019, vol. 13, pp. 397–406. (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S1990519X19050092

6. *Иванова М.В., Макаренко С.П., Суворова Г.Г.* Жирнокислотный состав суммарных липидов хвои *Picea obovata* в весенний период вегетации // Сиб. экол. журн. 2018. № 2. С. 239–247.

Ivanova M.V., Makarenko S.P., Suvorova G.G. Fatty Acid Composition of Total Lipids in Needles of *Picea obovata* in Spring Vegetation Period. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2018, no. 2, pp. 239–247. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/SEJ20180208

7. *Лось Д.А.* Десатуразы жирных кислот. М.: Науч. мир, 2014. 372 с.

Los' D.A. *Fatty Acid Desaturases*. Moscow, Nauchnyj mir Publ., 2014. 372 p. (In Russ.).

8. *Нохсоров В.В., Дударева Л.В., Петров К.А.* Сезонная динамика липидов и их жирных кислот в почках *Betula pendula* Roth и *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus в условиях криолитозоны // Физиология растений. 2020. Т. 67, № 3. С. 319–328. https://doi.org/10.31857/S0015330320030185

Nokhsorov V.V., Dudareva L.V., Petrov K.A. Seasonal Dynamics of Lipids and Their Fatty Acids in Leaf Buds of *Betula pendula* Roth and *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus under Conditions of the Cryolithozone. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2020, vol. 67, pp. 545–554. (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S1021443720030188

9. *Пономарев А.Г., Татаринова Т.Д., Перк А.А., Васильева И.В., Бубякина В.В.* Дегидрины, ассоциированные с формированием морозоустойчивости березы плосколистной // Физиология растений. 2014. Т. 61, № 1. С. 114–120. https://doi.org/10.7868/S0015330313060092

Ponomarev A.G., Tatarinova T.D., Perk A.A., Vasilieva I.V., Bubyakina V.V. Dehydrins Associated with the Development of Frost Resistance of Asian White Birch. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2014, vol. 61, pp. 105–111 (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S1021443713060095

10. *Семенова Н.В., Макаренко С.П., Шмаков В.Н., Константинов Ю.М., Дударева Л.В.* Жирнокислотный состав суммарных липидов хвои и каллусов некоторых хвойных: *Pinus sylvestris* L., *Picea pungens* Engelm., *Pinus koraiensis* Siebold Zucc. и *Larix sibirica* Ledeb. // Биол. мембраны: Журн. мембран. и клеточ. биологии. 2017. Т. 34, № 4. С. 298–306. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S0233475517040053

Semenova N.V., Makarenko S.P., Shmakov V.N., Konstantinov Y.M., Dudareva L.V. Fatty Acid Composition of Total Lipids from Needles and Cultured Calluses of Conifers *Pinus sylvestris* L., *Picea pungens* Engelm., *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc., and *Larix sibirica* Ledeb. *Biologicheskie membrany: Zhurnal membrannoj i kletochnoj biologii* = Biochemestry

(Moscow), Supplement Series A: Membrane and Cell Biology, 2017, vol. 11, pp. 287–295. (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S1990747817040092

11. *Татаринова Т.Д., Бубякина В.В., Ветчинникова Л.В., Перк А.А., Пономарев А.Г., Васильева И.В.* Стрессовые белки-дегидрины в почках березы в контрастных по климату регионах // Цитология. 2017. Т. 59, № 2. С. 156–160.

Tatarinova T.D., Bubyakina V.V., Vetchinnikova L.V., Perk A.A., Ponomarev A.G., Vasilieva I.V. Dehydrin Stress Proteins in Birch Buds in Regions with Contrasting Climate. *Tsitologiya* = Cell and Tissue Biology, 2017, vol. 11, pp. 483–488. (In Russ.). https://doi.org/10.1134/S1990519X17060098

12. *Титов А.Ф., Акимова Т.В., Таланова В.В., Топчиева Л.В.* Устойчивость растений в начальный период действия неблагоприятных температур. М.: Наука, 2006. 143 с.

Titov A.F., Akimova T.V., Talanova V.V., Topchieva L.V. *Plant Resistance during the Initial Period of Exposure to Unfavorable Temperatures*. Moscow, Nauka Publ., 2006.143 p. (In Russ.).

13. *Трунова Т.И.* Растение и низкотемпературный стресс. М.: Наука, 2007. 54 с.

Trunova T.I. *Plant and Low Temperature Stress*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 54 p. (In Russ.).

14. *Цельникер Ю.Л., Малкина И.С.* Баланс органического вещества в онтогенезе листа у лиственных деревьев // Физиология растений. 1986. Т. 33, № 5. С. 935–943.

Tsel'niker Yu.L., Malkina I.S. Organic Matter Balance in Leaf Ontogenesis in Deciduous Trees. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 1986, vol. 33, no. 5, pp. 935–943. (In Russ.).

15. Boldizsár Á., Soltész A., Tanino K., Kalapos B., Marozsán-Tóth Z., Monostori I., Dobrev P., Vankova R., Galiba G. Elucidation of Molecular and Hormonal Background of Early Growth Cessation and Endodormancy Induction in Two Contrasting *Populus* Hybrid Cultivars. *BMC Plant Biology*, 2021, vol. 21, art. no. 111. https://doi.org/10.1186/s12870-021-02828-7

16. Dar A.A., Choudhury A.R., Kancharla P.K., Arumugam N. The *FAD2* Gene in Plants: Occurrence, Regulation, and Role. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, art. no. 1789. https://doi.org/10.3389/flps.2017.91789

17. Delgado del Mar M., Roslin T., Tikhonov G., Meyke E., Lo C., Gurarie E., Abadonova M., Abduraimov O., Adrianova O., Akimova T., Akkiev M., Ananin A., Andreeva E., Andriychuk N., Antipin M. Differences in Spatial versus Temporal Reaction Norms for Spring and Autumn Phenological Events. *PNAS*, 2020, vol. 117, no. 49, pp. 31249–31258.

18. Grimberg Å., Lager I., Street N.R., Robinson K.M., Marttila S., Mähler N., Ingvarsson P.K., Bhalerao R.P. Storage Lipid Accumulation is Controlled by Photoperiodic Signal Acting via Regulators of Growth Cessation and Dormancy in Hybrid Aspen. *New Phytology*, 2018, vol. 219, iss. 2, pp. 619–630. https://doi.org/10.1111/nph.15197

19. Hernández M.L., Cejudo F.J. Chloroplast Lipids Metabolism and Function. A Redox Perspective. *Frontiers in Plant Science*, 2021, vol. 12, art. no. 712022. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.712022

20. Hugly S., Somerville C. A Role for Membrane Lipid Polyunsaturation in Chloroplast Biogenesis at Low Temperature. *Plant Physiology*, 1992, vol. 99, iss. 1, pp. 197–202. https://doi.org/10.1104/pp.99.1.197

21. Junttila O., Hänninen H. The Minimum Temperature for Budburst in *Betula* Depends on the State of Dormancy. *Tree Physiology*, 2012, vol. 32, iss. 3, pp. 337–345. https://doi.org/10.1093/treephys/tps010

22. Junttila O., Nilsen J., Igeland B. Effect of Temperature on the Induction of Bud Dormancy in Ecotypes of *Betula pubescens* and *Betula pendula*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 18, iss. 3, pp. 208–217. https://doi.org/10.1080/02827581.2003.9728291

23. Karlson D.T., Zeng Y., Stirm V.E., Joly R.J., Ashworth E.N. Photoperiodic Regulation of a 24-kD Dehydrin-Like Protein in Red-Osier Dogwood (*Cornus sericea* L.) in Relation to Freeze-Tolerance. *Plant Cell Physiology*, 2003, vol. 44, iss. 1, pp. 25–34. https://doi.org/10.1093/pcp/pcg006

24. Kosová K., Prášil I.T., Vítámvás P. Role of Dehydrins in Plant Stress Response. *Handbook of Plant and Crop Stress*. 4th ed. CRC Press, 2019, chapt. 10, pp. 239–286. https://doi.org/10.1201/9781351104609-10

25. Lyons J.M., Wheaton T.A., Pratt H.K. Relationship between the Physical Nature of Mitochondrial Membranes and Chilling Sensitivity in Plants. *Plant Physiology*, 1964, vol. 39, iss. 2, pp. 262–268. https://doi.org/10.1104/pp.39.2.262

26. Maurya J.P., Bhalerao R.P. Photoperiod- and Temperature-Mediated Control of Growth Cessation and Dormancy in Trees: a Molecular Perspective. *Annals of Botany*, 2017, vol. 120, iss. 3, pp. 351–360. https://doi.org/10.1093/aob/mcx061

27. Quinn P.J., Williams W.P. Plant Lipids and Their Role in Membrane Function. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 1979, vol. 34, iss. 1979, pp. 109–173. https://doi.org/10.1016/0079-6107(79)90016-6

28. Román A., Hernández M.L., Soria-García Á., López-Gomollón S., Lagunas B., Picorel R., Martínez-Rivas J.M., Alfonso M. Non-Redundant Contribution of the Plastidial FAD8 ω-3 Desaturase to Glycerolipid Unsaturation at Different Temperatures in *Arabidopsis*. *Molecular Plant*, 2015, vol. 8, iss. 11, pp. 1599–1611. https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.06.004

29. Sakamoto T., Murata N. Regulation of the Desaturation of Fatty Acids and its Role in Tolerance to Cold and Salt Stress. *Current Opinion in Microbiology*, 2002, vol. 5, iss. 2, pp. 206–210. https://doi.org/10.1016/S1369-5274(02)00306-5

30. Soria-García Á., Rubio M.C., Lagunas B., López-Gomollón S., de los Ángeles Luján M., Díaz-Guerra R., Picorel R., Alfonso M. Tissue Distribution and Specific Contribution of *Arabidopsis* FAD7 and FAD8 Plastid Desaturases to the JA- and ABA-Mediated Cold Stress or Defense Responses. *Plant & Cell Physiology*, 2019, vol. 60, iss. 5, pp. 1025–1040. https://doi.org/10.1093/pcp/pcz017

31. Strimbeck G.R., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröder P.W., Kjellsen T.D. Extreme Low Temperature Tolerance in Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, art. no. 884. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00884

32. Theocharis A., Clément C., Barka E.A. Physiological and Molecular Changes in Plants Grown at Low Temperatures. *Planta*, 2012, vol. 235(6), pp. 1091–1105. https://doi.org/10.1007/s00425-012-1641-y

33. Upchurch R. Fatty Acid Unsaturation, Mobilization, and Regulation in the Response of Plants to Stress. *Biotechnology Letters*, 2008, vol. 30, pp. 967–977. https://doi.org/10.1007/s10529-008-9639-z

34. Wallin E., Gräns D., Jacobs D.F., Lindström A., Verhoef N. Short-Day Photoperiods Affect Expression of Genes Related to Dormancy and Freezing Tolerance in Norway Spruce Seedlings. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, art. no. 59. https://doi.org/10.1007/s13595-017-0655-9

35. Xiao R., Zou Y., Guo X., Li H., Lu H. Fatty Acid Desaturases (FADs) Modulate Multiple Lipid Metabolism Pathways to Improve Plant Resistance. *Molecular Biology Reports*, 2022, vol. 49, pp. 9997–10011. https://doi.org/10.1007/s11033-022-07568-x

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 581.5
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-106-120

Жизнеспособность растений в условиях урбанизированной среды

Г.Ю. Морозова, канд. биол. наук; *ResearcherID: M-6380-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1183-3430*
Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, д. 56, г. Хабаровск, Россия, 680000; morozova-ivep@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.23 / Одобрена после рецензирования 19.05.23 / Принята к печати 22.05.23

Аннотация. Целью исследования является анализ жизненного состояния древесных растений в урбанизированной среде для решения проблем озеленения крупного города (на примере г. Хабаровска). Использованы методы геоботанического, лесотаксационного, флористического, популяционного анализа и морфометрического подхода. Формирование насаждений Хабаровска прошло путь от садово-приусадебного типа с немногочисленными садами и скверами до общественных озелененных пространств. Общая площадь озелененных территорий составляет 17 127,9 га с перспективой увеличения озеленения общего пользования к 2030 г. на 1435,9 га. Использование ограниченного ассортимента древесных пород в прошлом привело к формированию современного тополево-ильмового облика насаждений города. Массовые посадки тополей и вязов в 1950–1960 гг. создали проблему срочного сноса старовозрастных насаждений в больших объемах в настоящее время. Отмечается сокращение озелененных площадей в парках, недостаточный уход и, как следствие, снижение жизненного состояния растений. Состав дендрофлоры Хабаровска включает 59 видов деревьев, 58 видов кустарников и лиан, что приближается к показателю природного биоразнообразия. Относительное жизненное состояние древесных насаждений изменялось на разных городских объектах от 69 % (ослабленный древостой) до 94 % (здоровый древостой). В среднем по городу доля здоровых деревьев составляет 57,6 %, деревьев в удовлетворительном состоянии – 34,5 %, неудовлетворительном – 7,9 %. Использование популяционных методов исследования в решении проблем озеленения позволит провести подбор видов лиственных и хвойных пород, адаптированных к стрессам урбанизации, и создать экологически устойчивые, эстетически привлекательные и экономически более выгодные насаждения. Высокое разнообразие древесных растений отмечается в парках (89 видов) и на бульварах (77 видов), низкое – на городских площадях (9 видов) и основных проездах по городу (27 видов). Озеленение автотранспортной инфраструктуры представлено 55 видами. Область применения результатов: муниципальное управление, планирование и развитие городской территории.

Ключевые слова: озеленение, насаждения общего пользования, популяция, жизнеспособность, изменчивость, устойчивость, виталитетная структура, урбанизированная среда, урбоэкосистемы, Хабаровск, Дальневосточный федеральный округ

Для цитирования: Морозова Г.Ю. Жизнеспособность растений в условиях урбанизированной среды // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 106–120. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-106-120

© Морозова Г.Ю., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Original article

Plant Viability in an Urbanized Environment

Galina Yu. Morozova, *Candidate of Biology; ResearcherID: M-6380-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1183-3430*
Institute of Water and Ecology Problems of the Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, ul. Dikopol'tseva, 56, Khabarovsk, 680000, Russian Federation; morozova-ivep@mail.ru

Received on February 17, 2023 / Approved after reviewing on May 19, 2023 / Accepted on May 22, 2023

Abstract. The aim of the study has been to analyze the vitality of woody plants in an urbanized environment to solve the problems of landscaping a large city (using the example of Khabarovsk). The methods of geobotanical, forest inventory, floristic, population analysis and morphometric approach have been used. The formation of plantations in Khabarovsk has gone from a garden-homestead type with a few public gardens and squares to public landscaped spaces. The total area of green spaces is 17,127.9 ha, with the prospect of increasing the landscaping of public use areas by 1435.9 ha by 2030. The use of a limited range of trees species in the past has led to the formation of a modern poplar-elm appearance of the city's plantations. Mass plantings of poplars and elms in the 1950s and 1960s have created the problem of urgent demolition of old-growth plantations in large volumes at present. There is a reduction in green areas in parks, insufficient care and, as a result, a decrease in the vitality of plants. The composition of the dendroflora of Khabarovsk includes 59 species of trees and 58 species of shrubs and lianas, which is close to the natural biodiversity indicator. The relative vitality of tree plantations has varied at different urban areas from 69 % (weakened forest stand) to 94 % (healthy forest stand). On average, the proportion of healthy trees in the city is 57.6 %, of the tress in satisfactory condition – 34.5 %, in unsatisfactory – 7.9 %. The use of population-based research methods in solving landscaping problems will make it possible to select deciduous and coniferous species adapted to the stresses of urbanization and create environmentally sustainable, aesthetically attractive and economically more profitable plantations. A high diversity of woody plants is observed in parks (89 species) and on boulevards (77 species), a low one – in city squares (9 species) and main thoroughfares in the city (27 species). Landscaping of the motor transport infrastructure is represented by 55 types. The field of the results application: municipal management, as well as planning and development of urban areas.
Keywords: landscaping, public use plantations, population, viability, variability, stability, vitality structure, urbanized environment, urboecosystems, Khabarovsk, the Far Eastern Federal District

For citation: Morozova G.Yu. Plant Viability in an Urbanized Environment. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 106–120. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-106-120

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Введение

В результате стремительного процесса урбанизации более 68 % населения на планете к 2050 г., по прогнозам ООН, будут селиться в городах [41]. Аналогичная тенденция сохраняется и в Российской Федерации, где, по данным Росстата на 2019 г., 74,59 % граждан проживало в городах [17]. Уровень урбанизации в регионах нового освоения, к которым принадлежит Дальневосточный федеральный округ, сегодня уже превышает 75 % [27]. Урбанизация, являясь прогрессивным фактом в жизни цивилизации, порождает ряд экологических проблем, некоторые из них возможно решить с помощью совершенствования системы озеленения городов. Городская растительность оказывает непосредственное воздействие на устойчивое развитие и комфортность городской среды для населения. Система общественных озелененных пространств, включающая озеленение общего, ограниченного пользования и специального назначения, является важным компонентом градостроительного планирования, элементом зеленой инфраструктуры [6, 22, 33], поставщиком экосистемных услуг [29, 30, 38] и фактором оптимизации экологической среды [9]. Уровень озелененности городской территории является одним из индикаторов ее устойчивого развития [12] и показателей качества жизни людей. Особенности организации и функционирования озелененных пространств и повышение жизнеспособности растений в городах представляют интерес как для российских [6, 9, 21, 25], так и для зарубежных [31–37, 39, 40] исследователей.

Качество системы озеленения определяется соотношением застроенных и озелененных площадей в городском пространстве, наличием всего спектра озелененных объектов, а также уровнем жизнеспособности растений. Растительный компонент урбоэкосистем испытывает на себе воздействие стрессовых факторов урбанизации. На городских территориях поддержание высокой жизнеспособности древесных растений особо значимо, поскольку они выполняют экосистемные, санитарно-гигиенические, эстетические и социально-экономические функции. В настоящее время недостаточно изучено изменение жизненного состояния древесных пород как параметра, отражающего ответную реакцию растительного организма на комплексное воздействие факторов урбанизированной среды. Научные изыскания в этом направлении показывают, что популяционная структура видов урбанофлоры является важным индикатором их жизненного состояния и устойчивости. Системные сравнительные исследования структуры популяций растений по основным урбоэкотопам пока единичны, и это определяет задачи на предстоящие годы. Предлагаемый подход позволяет критически пересмотреть существующий ассортимент видов, применяемых в озеленении городов, увязать использование отдельных видов с типом насаждения и условиями произрастания.

Снижение жизненности у растений происходит из-за низкого качества почв и почвогрунтов, ограниченной площади питания растений, загрязнения воздуха, действия химических реагентов, механических повреждений и поражения болезнями и вредителями, высоких рекреационных нагрузок [3, 11]. Адаптации растений в городской среде являются видоспецифическими, они осуществляются за счет высокой пластичности и изменчивости морфоструктуры растительного организма, а также перестройки их популяционной структуры (размерной, виталитетной, пространственной, генетической и др.) [7, 14].

Показатели роста и развития растений, виталитетная структура, связанная с ценотическими и экологическими аспектами, качество популяций дают объективную картину жизнеспособности видов в городской среде, что позволяет подобрать устойчивые и экологически пластичные виды растений для городского зеленого строительства. Цель работы – анализ жизненного состояния древесных растений в урбанизированной среде для решения проблем озеленения современного крупного города (на примере г. Хабаровска).

Объекты и методы исследования

Состояние зеленых насаждений города и жизнеспособность древесных растений изучали в ходе разновременных маршрутных исследований. К анализу привлекали материалы инвентаризации, проведенной по стандартной методике (Методика инвентаризации городских зеленых насаждений, 1997 г.) сотрудниками Института водных и экологических проблем ДВО РАН (2002–2023 гг.). Использованы фондовые материалы Управления по охране окружающей среды и природных ресурсов администрации г. Хабаровска. Применены методы геоботанического, лесотаксационного, флористического, популяционного анализа и морфометрического подхода. Относительное жизненное состояние древесных насаждений определяли по методике В.А. Алексеева [1]. Состояние деревьев оценивали по качественным характеристикам: густота и цвет кроны, облиственность (охвоенность), наличие механических повреждений, суховершинность, присутствие усыхающих ветвей в кроне, соответствие габитуса растения стандартным характеристикам вида.

Популяционную структуру доминирующих в озеленении города растений изучали в соответствии с направлением популяционно-онтогенетических исследований [7, 8, 28]. Морфометрический анализ проводили по количественным параметрам, которые характеризовали состояние особей. Детерминирующий комплекс морфометрических признаков для определения виталитетной структуры популяций *Ulmus pumila* L. (вегетативное онтогенетическое состояние) составили: длина годового прироста побега, площадь листовой поверхности годового побега, фитомасса листьев годового побега. Фитомассу определяли в абсолютно сухом состоянии, взвешивание проводили на электронных весах HR–200. Для каждого признака вычислены среднее арифметическое значение и его ошибка, коэффициент вариации.

Качество популяций рассчитывали по формуле $Q = ½ (a + b)$, где a, b – доля особей высшего и промежуточного классов виталитета соответственно [7]. Классы жизнеспособности деревьев (экспертные оценки) перевели в классы виталитета древостоя: хорошее состояние – a, удовлетворительное (ослабленное) – b, неудовлетворительное (угнетенное) – c. По уровню виталитета выделяли 3 типа популяций: процветающие ($Q > c$), равновесные ($Q = c$), депрессивные ($Q < c$) [7, 8], где c – доля особей низшего класса виталитета.

Сбор данных осуществляли в 2018–2021 гг. в урбанизированных экотопах, характеризующихся разной степенью антропогенной трансформации, которые включали: насаждения парков, бульваров, магистральные посадки, растительность вдоль основных, внутриквартальных улиц, придомовое озеленение. Для анализа жизненного состояния хвойных растений в городской среде в качестве контроля использованы растения из фитоценозов пригородного лесопарка. В ходе инвентаризации было обследовано около 3000 деревьев. По-

лученные материалы статистически обработаны с использованием программ Excel, Statistica и VIT, разработанной Ю.А. Злобиным.

Результаты исследования и их обсуждение

Озеленение Хабаровска сложилось за 165-летний период становления города и прошло путь от садово-приусадебного типа с линейными посадками деревьев и кустарников на центральных улицах и возле общественных зданий и несколькими общественными садами [4, 12, 19] до современных многофункциональных общественных озелененных пространств. Система городского озеленения, заложенная в прошлом, соответствовала природно-климатическим особенностям региона, градостроительным нормам, социальным потребностям и традиционным устоям горожан. За сравнительно небольшой период сформированы насаждения общего, ограниченного пользования и специального назначения. К началу XXI в. была создана система зеленых насаждений с высокими показателями озелененности города, общая площадь озеленения составляла около 4000 га [10, 26]. Насаждения общего и ограниченного пользования включали 11 парков (104,6 га), 1 сад (24,6 га), 3 рощи (41,1 га), 1 дендрарий (11,4 га), 3 питомника (283,89 га), 5 скверов (8,81 га) и 2 бульвара (67,5 га), которые были объединены насаждениями городской транспортной инфраструктуры с пригородными лесами. На одного жителя приходилось до 18 м^2 насаждений, в т. ч. в объектах общего пользования – до 9,5–10 м^2 [23].

Ассортимент пород, используемых населением в озеленении, в основном состоял из видов, которые произрастали в окрестностях города, и немногочисленных пород, привезенных переселенцами с западной части страны (например, шелковица белая *Morus alba* L.). До настоящего времени на окраинах поселения сохранилось лишь небольшое количество участков с естественной лесной растительностью разной стадии дигрессии, а основная часть зеленого фонда города представлена искусственно сконструированными зелеными насаждениями. Активно начавшаяся уплотнительная застройка территории и резкое увеличение парка автомобилей негативно сказались на состоянии городского озеленения. Недостаток финансирования в 90-е гг. прошлого столетия привел к упадку внутриквартального озеленения, оказались запущенными некоторые периферийные парки и городской дендрарий [25], на отдельных участках улиц уничтожены газоны, постепенно исчезли разделительные озелененные полосы на автомагистралях. Заметно ухудшилось качество насаждений из-за отсутствия систематического своевременного ухода.

Критический анализ ситуации в озеленении и приведение в соответствие с действующим законодательством нормативно-правовых актов в сфере благоустройства города заметно оживили зеленое строительство в начале 2000-х гг. Были скорректированы и утверждены законодательные документы по охране, содержанию и воспроизводству зеленого фонда города, разработаны концепция озеленения [16] и долгосрочная целевая программа «Развитие озеленения территории города Хабаровска на 2012–2020 гг.» [15]. Возобновили санитарные рубки, рубки ухода в древесных посадках, провели инвентаризацию зеленого фонда и посадки деревьев и кустарников, восстановили работу городского питомника, существенно увеличив его производительность для городских и краевых нужд. Тем не менее к проблемам зеленого строительства, которые не решены до настоящего времени, относится сокращение озелененной площади

парков за счет активизации их коммерческой деятельности. Наблюдаются попытки внедрения многофункциональной направленности работы небольших по площади городских парков, что приводит к резкому сокращению озелененной площади объектов. Отмечается недостаток крупных по площади городских парков, детских парков, специализированных (спортивных) районных парков и садов для активной части населения, продолжается практика создания переуплотненных древесных посадок, не завершен процесс сноса старовозрастных насаждений, высока доля ослабленных и угнетенных растений.

Общая площадь городских озелененных территорий составляет 17 127,9 га. В соответствии с программой стратегического развития города до 2025 г. и на перспективу площадь озеленения планируется увеличить до 18 530,5 га [5]. В этом показателе, характеризуясь важной природоохранной, социальной и экономической ролями, значительную долю имеет озеленение общего пользования, площадь которого должна быть увеличена к 2030 г. на 1435,9 га (табл. 1). Проект предусматривает заложение универсальных и специализированных районных парков, которые отсутствуют в городе на данный момент. Сохранившиеся участки лесных массивов, расположенные на землях Министерства обороны РФ и недоступные в настоящее время для отдыха горожан, частично передают в муниципальную собственность для расширения площадей существующих парков (парк Дома офицеров флота) и организации спортивных и природно-рекреационных комплексов (Школа олимпийского резерва на Воронежских высотах). К 2030 г. планируется создание луговых парков и гидропарков на российской части Большого Уссурийского острова, относительно недавно включенного в черту г. Хабаровска.

Таблица 1

Классификация зеленых насаждений общего пользования в г. Хабаровске*
The classification of public green spaces in the city of Khabarovsk

Озелененные объекты	Площадь насаждений, га		
	фактическая	планируемая до 2030 г.	*итого*
Общегородские парки	207,5	565,5	773,0
Районные парки	–	164,1	164,1
Скверы	76,8	150,9	227,7
Бульвары	60,8	113,7	174,5
Набережные	12,0	69,1	81,1
Детские парки	1,8	15,8	17,6
Лесопарки	–	232,6	232,6
Площади и памятники	39,4	1,9	41,3
Лугопарки	–	57,6	57,6
Гидропарки	–	64,7	64,7
Всего	398,3	1435,9	1834,2

*Изменения в генеральный план городского округа «Город Хабаровск». Приложение к решению Хабаровской городской Думы от 21.04.2015 г. № 97.

В начале 90-х гг. прошлого столетия почти все крупные озелененные объекты города были включены в сеть особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Сегодня сеть ООПТ общей площадью 585,45 га состоит из ООПТ краевого значения (5 объектов) площадью 212,43 га и ООПТ местного значения

(24 объекта) – 373,02 га. В городе насчитывается 14 парковых зон общей площадью 178,27 га, 1 природный парк – 163,94 га, 2 питомника – 119,95 га, 2 природно-рекреационных комплекса – 65,61 га, 4 памятника природы – 48,49 га, 7 скверов, относящихся к категории ООПТ, – 11,99 га [13]. Обследование городских ООПТ показало, что их основная часть представлена искусственными насаждениями и только 11 объектов (295,00 га) организованы на участках с сохранившимися фрагментами дубняков, ясеневников, березняков и смешанных лесов естественного происхождения.

При озеленении городов важно сохранение ландшафтного и повышения биологического разнообразия древесно-кустарниковых растений. В результате многолетних научных исследований [20, 24] специалистами Дальневосточного научно-исследовательского института лесного хозяйства рекомендовано для зеленого строительства 16 видов хвойных и 60 видов лиственных деревьев, 226 видов кустарников и лиан [2]. По данным инвентаризации зеленых насаждений, ассортимент пород, используемых в настоящее время, включает 59 видов деревьев и 58 видов кустарников и лиан, что приближается к показателю природного биоразнообразия окрестных лесов [12, 18].

При высоких темпах индустриализации страны и массовом домостроении в середине прошлого века для благоустройства городов потребовался недорогой быстрорастущий посадочный материал в больших объемах. В Хабаровске основу ассортимента составили тополя (*Populus nigra* L., *P. balsamifera* L., *P. deltoids* W. Bartram ex Marshall) и вязы (*Ulmus pumila*). Жители массово использовали для озеленения улиц города ясень маньчжурский (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), березу плосколистную (*Betula platyphylla* Sukacz.) и даурскую (*B. dahurica*), из хвойных – сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris* L.), лиственницу (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen) и ель (*Picea obovata* Lebed.). В садах чаще всего выращивали яблоню сибирскую (*Malus baccata* (L.) Borkh.), абрикос маньчжурский (*Prunus mandshurica* (Maxim.) Koehne), грушу уссурийскую (*Pyrus ussuriensis* Maxim. ex Rupr.) и др.

Применение в последнее десятилетие при реконструкции насаждений аборигенных и интродукционных видов деревьев и кустарников повысило биоразнообразие растений в парках до 89 видов, а на бульварах – до 77. В таких насаждениях можно встретить аралию высокую (*Aralia elata* (Miq.) Seem.), дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), ильм горный (*Ulmus glabra* Huds.), ильм японский (*U. japonica* (Render), Sarg.), маакию амурскую (*Maackia amurensis* Rupr.), орех маньчжурский (*Juglans mandshurica* Maxim.), бархат амурский (*Phellodendron amurense* Rupr.), сосну корейскую (*Pinus koraiensis* Sibold & Zucc.), сирень амурскую (*Syringa amurensis* Rupr.), секуринегу полукустарниковую (*Securinega suffruticosa* (Pall.) Rehd.), элеутерококк колючий (*Eleutherococcus senticosus* (Rupr. & Maxim.) Maxim.), шелковицу белую, ильм гладкий (*U. laevis* Pall.) и др. Относительно бедный ассортимент растений сохраняется во внутриквартальном озеленении (18 видов деревьев), где доминируют *P. nigra*, *U. pumila*, *Fraxinus mandshurica* и *Acer negundo* L., а дополняют растительные композиции *B. platyphylla*, *Malus baccata*, редко встречается *P. sylvestris*.

Качество озеленения как важнейшая часть зеленой инфраструктуры определяет привлекательный облик города и складывается не только из площади озелененных объектов, но и из жизнеспособности деревьев и кустарников, выполнения ими экологических, санитарно-гигиенических, планировочных и эстетических

функций. При формировании многофункциональных озелененных пространств Хабаровска использование устойчивого ассортимента древесно-кустарниковых растений становится исключительно важным как по биоэкологическим параметрам, так и по экономическим показателям. Анализ выявил, что относительное жизненное состояние древесных насаждений меняется на разных городских объектах от 69 % (ослабленный древостой) до 94 % (здоровый древостой) (табл. 2). В среднем по городу доля здоровых деревьев составляет 57,6 %. К деревьям удовлетворительного состояния было отнесено 34,5 %, а неудовлетворительного – 7,9 %.

Таблица 2

Оценка жизненного состояния древесных насаждений в г. Хабаровске
The assessment of the vitality of tree plantations in the city of Khabarovsk

Озелененные объекты	Число видов, шт.		Индекс относительного жизненного состояния, %	Категория жизненного состояния насаждения
	Деревья	Кустарники		
Парки	58	31	68,67	Ослабленное
Площади	6	3	86,69	Здоровое
Внутриквартальные улицы	23	22	73,43	Ослабленное
Бульвары	39	38	93,78	Здоровое
Автомагистрали	30	21	82,56	
Основные проезды	20	7	74,92	Ослабленное

В целом виды, доминирующие в озеленении города (*Pinus nigra*, *Ulmus pumila*, *Fraxinus mandschurica*, *Acer negundo*), более устойчивы и формируют популяции процветающего типа, которые хорошо адаптированы к условиям урбанизации. *U. pumila*, *F. mandschurica*, *A. negundo* спонтанно возобновляются в разных городских местообитаниях. Неудовлетворительная ситуация наблюдается во внутриквартальных насаждениях города, где только 34,4 % деревьев являются здоровыми, а 50 % – ослабленные (рис. 1). Обследование насаждений на 2 центральных бульварах, являющихся визитной карточкой города, показало, что 96,5 % всех деревьев относятся к растениям высокого жизненного состояния (здоровые). На наш взгляд, это обусловлено проведенной в недалеком прошлом крупномасштабной реконструкцией насаждений и систематическим уходом за ними. В городских парках доля деревьев высокой жизненности относительно небольшая – 46,2 %, ослабленных – 32 %. Требуется привлечение сил и финансовых средств к решению данной проблемы.

Массовые посадки тополей и вязов, проведенные в 1950–1960 гг., определили современный тополево-ильмовый облик города. *U. pumila* – чужеродный во флоре региона вид [19], активно расселившийся и натурализовавшийся не только в нарушенных городских, но и в естественных местообитаниях дальневосточного региона. *U. pumila* устойчиво сохраняет свои позиции на ранних стадиях онтогенеза (вегетативное онтогенетическое состояние), произрастая в разных городских экотопах. Спонтанно самовозобновляющиеся популяции *U. pumila* можно встретить повсюду в парках, на пустырях, по обочинам дорог, вдоль трамвайных путей (в виде кустовой жизненной формы). Виталитетный анализ показал, что оптимальными для роста *U. pumila* являются условия в насаждениях внутриквартального озеленения. Здесь доля растений высшего класса жизненного состояния составляет 100 % (рис. 2).

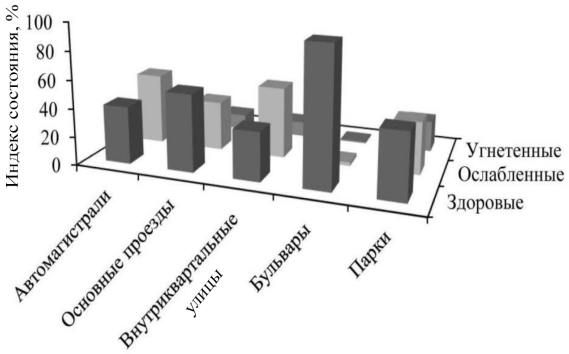


Рис. 1. Жизненное состояние древесных насаждений г. Хабаровска, 2021 г.

Fig. 1. The vitality of tree plantations in the city of Khabarovsk, 2021

На городских бульварах также преобладают растения высокого класса жизненности (63,6 %). Индекс качества популяции в обоих вариантах экотопов равен 0,500. В парках *U. pumila* сохраняет высокие значения жизненного состояния, хотя доля растений высшего класса виталитета снижается до 50,6 %, промежуточного – до 44,9 %, здесь также формируются популяции процветающего типа ($Q = 0{,}478$). Соотношение разных виталитетных групп несколько падает в молодом состоянии в посадках *U. pumila* вдоль основных городских проездов (улицы): доля растений высшего класса виталитета – 34,9 %, низшего – 32,1 %, а качество популяции уменьшается до 0,308. Аналогичная ситуация наблюдается и у растений, произрастающих вдоль автомагистралей.

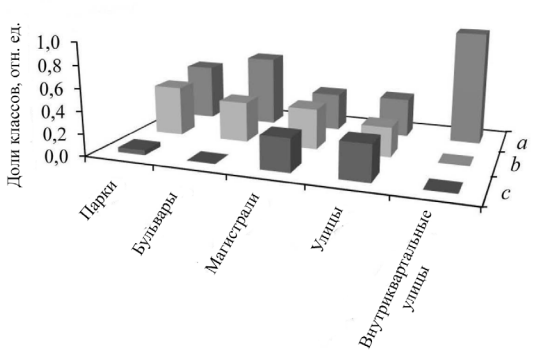


Рис. 2. Виталитетные спектры популяций *Ulmus pumila* по градиенту урбанизированных экотопов в г. Хабаровске, 2020–2021 гг. (вегетативное онтогенетическое состояние)

Fig. 2. The vitality spectra of *Ulmus pumila* populations according to the gradient of urbanized ecotopes in the city of Khabarovsk, 2020–2021 (vegetative ontogenetic state)

В озеленении Хабаровска всегда отмечался недостаток хвойных пород деревьев. Поэтому в последнее десятилетие проводили их массовые посадки по всему городу. Наибольшее число хвойных пород (*Pinus sylvestris*, *Larix gmelinii*, *P. koraiensis*, *Picea ejzoensis* (Sibold & Zucc.) Carriere, *Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.) отмечено в аллейных посадках на бульварах и в парках, соответственно 15,7 и 10,5 %. В озеленении основных проездов по городу и вдоль автомагистралей хвойные деревья (*P. sylvestris*, *L. gmelinii*) используют ограниченно – 5,2 и 4,8 % соответственно. В то же время наблюдается применение *P. sylvestris* в озеленении автотрасс и городских дорог с высокой интенсивностью движения автотранспорта, где озеленительный эффект посадок низкий, поскольку растения долго приживаются и доля отпада саженцев и молодых растений доходит до 60–70 %, а выжившие растения много болеют и выглядят ослабленными или угнетенными. Недостаточно хвойных деревьев в озеленении придомовых участков и на разделительных полосах небольших внутриквартальных улиц – в среднем 1,3 %.

В последние годы на придомовых участках активно высаживают *L. gmelinii*, *P. sylvestris.* Имеется положительный опыт выращивания *P. koraiensis* в городских парках, где растения рано начинают плодоносить, например, созданы небольшие биогруппы в парке Динамо. Шире стали использовать *P. koraiensis* в скверах. Отмечены линейные посадки вида в уличном озеленении, где из-за загазованности воздуха и солнечных ожогов молодые деревья долго болеют и не имеют декоративного эффекта. Анализ относительного жизненного состояния хвойных пород в городском озеленении показал, что наиболее устойчивой по градиенту урбоэкотопов является *L. gmelinii*. Коэффициент относительного жизненного состояния был высок и изменялся в диапазоне от 80,5 % (в сомкнутых фитоценозах пригородных лесопарков) до 90,0 % (уличное озеленение), характеризуя все насаждения как здоровые (табл. 3). Несколько снижается относительное жизненное состояние у *L. gmelinii* в скверах (88,6 %). Попытки выращивания *P. sylvestris* вдоль городских автомагистралей и основных проездов по городу, загруженных автотранспортом, не имеют хорошего результата. В уличном озеленении индекс относительного жизненного состояния снижается до 66,0 %, свидетельствуя об ослабленности насаждений сосны обыкновенной. Оптимальными условиями для роста растения являются пригородные (90,0 %), городские (85,9 %) парки и скверы, удаленные от загруженных автотранспортом перекрестков (85,0 %). Посадку хвойных деревьев необходимо проводить с учетом изменения их относительного жизненного состояния в разных городских условиях. Использование этих видов должно быть ограничено парками, садами, рощами и лесопарками.

Таблица 3

Характеристика жизненного состояния хвойных насаждений по градиенту урбоэкотопов в г. Хабаровске (вегетативное онтогенетическое состояние)

The characteristics of the vitality of coniferous plantations according to the gradient of urboecotopes in the city of Khabarovsk (vegetative ontogenetic state)

Урбоэкотоп	*Larix gmelinii*		*Pinus sylvestris*		*P. koraiensis*	
	Индекс относительного жизненного состояния насаждения, %	Категория жизненного состояния насаждения	Индекс относительного жизненного состояния насаждения, %	Категория жизненного состояния насаждения	Индекс относительного жизненного состояния насаждения, %	Категория жизненного состояния насаждения
Уличное озеленение	90,0	Здоровое	66,0	Ослабленное	66,0	Ослабленное
Сквер	88,6		85,0	Здоровое	81,0	Здоровое
Пригородный лесопарк	80,5		90,0		83,5	
Селитебная зона	–	–	75,0	Ослабленное	–	–
Парк	95,7	Здоровое	85,9	Здоровое	91,2	Здоровое

Примечание: Прочерк – отсутствие данных.

Система озеленения является частью архитектурно-градостроительной инфраструктуры, она обеспечивает безопасную экологическую обстановку, создает комфорт и повышает социальную привлекательность города. Фактор озеленения входит в группу индикаторов устойчивого развития городской среды.

Современные концепции озеленения городов направлены не только на расширение озелененных площадей до нормативов, повышение биологического разнообразия растений, но и на поддержание устойчивости видов растений и городских фитоценозов. Формирование искусственных зеленых насаждений должно опираться на сведения об адаптации древесно-кустарниковых растений к урбанизированной среде. Сохранение в городах безопасных и комфортных условий для жизнедеятельности человека возможно путем поддержания на высоком уровне жизнедеятельности растений, находящихся на урбанизированных территориях. Высокий уровень жизнеспособности древесно-кустарниковых растений в городских поселениях улучшает экологическую, санитарно-гигиеническую обстановку и качество городской среды для населения.

Заключение

Ретроспективный анализ озеленения городских территорий (на примере г. Хабаровска) позволил выявить причины негативных явлений в зеленом строительстве. Использование ограниченного ассортимента древесных пород привело к формированию современного тополево-ильмового облика города и создало проблему срочного сноса переуплотненных старовозрастных насаждений в больших объемах в настоящем. Отмечаются диспропорции и недостатки в системе существующего озеленения – сокращение озелененных площадей общего пользования, недостаточный уход и, как следствие, снижение жизненного состояния (виталитета) растений.

Состав дендрофлоры г. Хабаровска включает 59 видов деревьев, 58 видов кустарников и лиан, что приближается к показателю природного биоразнообразия. Наибольшее число древесно-кустарниковых растений произрастает в парках (89 видов) и на бульварах (77 видов), низкое разнообразие растений характерно для парадного озеленения городских площадей (9 видов) и основных проездов по городу (27 видов). На автомагистралях и внутриквартальных улицах произрастает 51 и 55 видов соответственно.

Доля здоровых деревьев на разных озелененных объектах города составляет в среднем 57,6 %, удовлетворительного состояния – 34,5 %, неудовлетворительного – 7,9 %. Относительное жизненное состояние древесных насаждений изменялось от 69 % (ослабленный древостой) до 94 % (здоровый древостой) и зависело от уровня стрессового воздействия урбанизированной среды и качества ухода. В городских парках деревья высокой жизненности составляют 46,2 %, ослабленных растений – 32 %.

Изучение адаптационных механизмов видов в городских экосистемах позволяет подобрать ассортимент растений с учетом их индивидуальных реакций на стрессы урбанизированной природной среды. Среди хвойных пород наиболее устойчивой по градиенту урбоэкотопов является *Larix gmelinii*. Коэффициент относительного жизненного состояния насаждений вида был высок и изменялся в диапазоне от 80,5 % (в сомкнутых фитоценозах пригородных лесопарков) до 90,0 % (уличное озеленение), характеризуя все насаждения как здоровые. Относительное жизненное состояние насаждений *Pinus sylvestris* и *P. koraiensis*, расположенных вдоль городских автомагистралей, – ослабленное, что диктует необходимость корректировки ассортимента в связи с типом насаждений и условиями произрастания. Популяционный мониторинг в решении

проблем озеленения позволит подобрать древесные породы, адаптированные к стрессам урбанизации, и создать экологически устойчивые, эстетически привлекательные и финансово менее затратные насаждения. Полученные в ходе исследования сведения необходимо учитывать при планировании и развитии общественных озелененных пространств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Алексеев В.А.* Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

Alekseev V.A. Diagnostics of the Vitality of Trees and Stands. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1989, no. 4, pp. 51–57. (In Russ.).

2. Ассортимент древесных и кустарниковых растений для зеленого строительства и создания лесных культур в зеленых зонах Хабаровского края: практ. рекомендации / сост. В.М. Тагильцева, А.М. Кормилицына. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1987. 32 с.

Assortment of Woody and Shrubby Plants for Green Construction and Creation of Forest Crops in the Green Areas of the Khabarovsk Territory: Practical Recommendations. Comp. by V.M. Tagil'tseva, A.M. Kormilitsyna. Khabarovsk, 1987. 32 p. (In Russ.).

3. *Бухарина И.Л., Двоеглазова А.А.* Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях: моногр. Ижевск: Удмурт. ун-т, 2010. 184 с.

Bukharina I.L., Dvoeglazova A.A. *Bioecological Features of Herbaceous and Woody Plants in Urban Plantations.* Izhevsk, Udmurt State University Publ., 2010. 184 p. (In Russ.).

4. *Ганенко И.Г.* Зеленое строительство Дальневосточного края // Зелен. стр-во. 1939. № 9–10. С. 34–39.

Ganenko I.G. Green Construction of the Far Eastern Territory. *Zelenoe stroitel'stvo*, 1939, no. 9–10, pp. 34–39. (In Russ.).

5. Действующий генеральный план города Хабаровска. Режим доступа: https://khv27.ru/administration/structural-units/dasiz/gradostroitelstvo/generalnyy-plan-goroda-khabarovska/deystvuyushchiy-generalnyy-plan-goroda-khabarovska/?ysclid=m2a5ifjl116126943852 (дата обращения: 12.02.22).

The Current Master Plan of the City of Khabarovsk. (In Russ.).

6. *Душкова Д.О., Кириллов С.Н.* Зеленая инфраструктура города: опыт Германии // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 3: Экономика. Экология. 2016. № 2(35). С. 136–147.

Dushkova D.O., Kirillov S.N. Urban Green Infrastructure: German Experience. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Ekonomika* = Journal of Volgograd State University. Series 3: Economics, 2016, no. 2(35), pp. 136–147. (In Russ.). https://doi.org/10.15688/jvolsu3.2016.2.14

7. *Злобин Ю.А.* Популяционная экология растений: современное состояние, точки роста: моногр. Сумы: Унив. кн., 2009. 263 с.

Zlobin Yu.A. *Population Ecology of Plants: Current State, Growth Points.* Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2009. 263 p. (In Russ.).

8. *Злобин Ю.А., Скляр В.Г., Клименко А.А.* Популяции редких видов растений: теоретические основы и методика изучения: моногр. Сумы: Унив. кн., 2013. 439 с.

Zlobin Yu.A., Sklyar V.G., Klimenko A.A. *Populations of Rare Plant Species: Theoretical Foundations and Methods of Study*: Monograph. Sumy, Universitskaya kniga Publ., 2013. 439 p. (In Russ.).

9. *Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Курбаковская А.В.* Оценка геоэкологических функций зеленой инфраструктуры в городах Канады // География и природ. ресурсы. 2016. № 2. С. 191–200.

Klimanova O.A., Kolbovskii E.Yu., Kurbakovskaya A.V. Assessing the Geoecological Functions of the Green Infrastructure in Cities of Canada. *Geografiya i prirodnye resursy* = Geography and Natural Resources, 2016, vol. 37, pp. 165–173. https://doi.org/10.1134/S1875372816020116

10. *Мамешин Е.Д.* Наш город: заметки архитектора. Хабаровск: Хабаров. кн. изд-во, 1958. 52 с.

Mameshin E.D. *Our City: the Architect's Notes*. Khabarovsk, Khabarovsk Publ. House, 1958. 52 p. (In Russ.).

11. *Маракаев О.А., Смирнова Н.С., Загоскина Н.В.* Техногенный стресс и его влияние на лиственные древесные растения (на примере парков г. Ярославля) // Экология. 2006. № 6. С. 410–415.

Marakaev O.A., Smirnova N.S., Zagoskina N.V. Technogenic Stress and its Effect on Deciduous Trees (an Example from Parks in Yaroslavl). *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2006, vol. 37, pp. 373–377. https://doi.org/10.1134/S1067413606060026

12. *Морозова Г.Ю., Дебелая И.Д.* Анализ проблем озеленения современного города (на примере Хабаровска) // Вестн. Дальневост. отд-ния Рос. акад. наук. 2018. № 4(200). С. 38–48.

Morozova G.Yu., Debelaya I.D. The Analysis of the Modern City Gardening Problems (on an Example of Khabarovsk). *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk*, 2018, no. 4(200), pp. 38–48. (In Russ.).

13. *Морозова Г.Ю., Дебелая И.Д., Дубянская И.Г.* Особо охраняемые природные территории города Хабаровска. Хабаровск: Хабаров. вести, 2021. 165 с.

Morozova G.Yu., Debelaya I.D., Dubyanskaya I.G. *Specially Protected Natural Areas of the City of Khabarovsk.* Khabarovsk, Khabarovskie vesti Publ., 2021. 165 p. (In Russ.).

14. *Морозова Г.Ю., Злобин Ю.А., Мельник Т.И.* Растения в урбанизированной природной среде: формирование флоры, ценогенез и структура популяций // Журн. общ. биологии. 2003. Т. 64, № 2. С. 166–180.

Morozova G.Yu., Zlobin Yu.A., Melnik T.I. Plants in Urbanized Environment: Florogenesis, Coenogenesis and Population Structure. *Zhurnal obshchey biologii*, 2003, vol. 64, no. 2, pp. 166–180. (In Russ.).

15. *Морозова Г.Ю., Лаптиёв Г.А., Иванова В.В., Кислова Т.И.* Долгосрочная целевая программа «Развитие озеленения территории города Хабаровска на 2012–2020 гг.». Хабаровск: Хабаров. вести, 2012. 33 с.

Morozova G.Yu., Laptiyov G.A., Ivanova V.V., Kislova T.I. *Long-Term Target Program «Development of Landscaping in the City of Khabarovsk for 2012–2020»*. Khabarovsk, Khabarovskie vesti Publ., 2012. 33 p. (In Russ.).

16. *Морозова Г.Ю., Нарбут Н.А., Бабурин А.А., Воронов Б.А., Скачков В.Б., Горнова М.И., Ахтямов М.Х., Росликова В.И.* Концепция озеленения Хабаровска / под ред. Б.А. Воронова. Хабаровск: Ин-т вод. и экол. проблем Дальневост. отд-ния Рос. акад. наук, 2003. 38 с.

Morozova G.Yu., Narbut N.A., Baburin A.A., Voronov B.A., Skachkov V.B., Gornova M.I., Akhtyamov M.Kh., Roslikova V.I. *The concept of Landscaping in Khabarovsk*. Ed. by B.A. Voronov. Khabarovsk, Institute of Water and Ecology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. 38 p. (In Russ.).

17. Население России. Режим доступа: https://countrymeters.info/ru/Russian_Federation (дата обращения: 24.04.22).

Population of Russia. (In Russ.).

18. *Нечаев А.П., Бабурин А.А.* Деревья, кустарники и лианы хребта Хехцир // Растительный и животный мир Дальнего Востока: сб. ст. / редкол.: проф. А.П. Нечаев (отв. ред.) и др.; М-во просвещения РСФСР. Хабар. гос. пед. ин-т. Хабаровск, 1973. С. 19–31.

Nechaev A.P., Baburin A.A. Trees, Shrubs and Lianas of the Khekhtsir Ridge. *Rastitel'nyj i zhivotnyj mir Dal'nego Vostoka*: Collection of Articles. Ed. board: prof. A.P. Nechaev (ed.-in-chief) et al. Khabarovsk, Ministry of Public Education of the Russian Soviet Federative Socialist Republic, 1973, pp. 19–31. (In Russ.).

19. *Новомодный Е.В.* Памятники зеленого строительства, сохранившиеся с дореволюционного времени в городе Хабаровске // Культурный облик Хабаровска в XX веке: материалы гор. науч.-практ. конф. Хабаровск, 1999. С. 34–37.

Novomodnyj E.V. Monuments of Green Construction, Preserved from Pre-Revolutionary Times in the City of Khabarovsk. *The Cultural Image of Khabarovsk in the 20th Century*: Proceedings of the City Scientific and Practical Conference. Khabarovsk, 1999, pp. 34–37. (In Russ.).

20. Озеленение населенных пунктов Хабаровского края / Гл. упр. Лесн. хоз-ва и охраны леса при Совете Министров СССР. Дальневост. науч.-исслед. ин-т лесн. хоз-ва. Хабаровск: Кн. изд-во, 1961. 104 с.

Landscaping of Settlements in the Khabarovsk Territory. Khabarovsk, Main Directorate of Forestry and Forest Protection under the Council of Ministers of the USSR, Far East Forestry Research Institute, Khabarovsk Publ. House, 1961. 104 p. (In Russ.).

21. *Подойницына Д.С.* Критический анализ концепции «Зеленая инфраструктура» // Архитектура и соврем. информ. технологии. 2016. № 1(34). Ст. № 12. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=25478465&ysclid=m2ad5qko3y324428054 (дата обращения: 25.10.24).

Podoynitsyna D.S. Critical Analysis of the Green Infrastructure Concept. *Arkhitektura i sovremennye informatsionnye tekhnologii* = Architecture and Modern Information Technologies, 2016, no. 1(34), art. no. 12. (In Russ.).

22. *Подойницына Д.С., Хомяков Д.А., Гладова П.К.* Инфраструктурный подход в формировании системы озеленения природно-урбанизированной надсистемы // Интернет-журн. «Науковедение». 2016. Т. 8, № 6(37). Ст. № 92. Режим доступа: https://naukovedenie.ru/PDF/92TVN616.pdf (дата обращения: 12.04.22).

Podojnicyna D.S., Homyakov D.A., Gladova P.K. Infrastructure Approach to Forming a Green Areas System of Green-Urban Super System. "*Naukovedenie" Internet Journal*, 2016, vol. 8, no. 6(37), art. no. 92. (In Russ.).

23. Превратим Хабаровск в цветущий город-сад // Тихоокеан. звезда. 1961. 8 апр. (№ 84 (10909)).

Let's Turn Khabarovsk into a Blooming Garden City. *Tichookeanskaya zvezda*, 1961, April 8, no. 84(10909). (In Russ.).

24. *Сенчукова Г.В., Кормилицына А.М., Ганенко И.Г. и др.* Зеленый наряд города (Озеленение населенных пунктов Дальнего Востока) / предисл. Чумина В.Т. Хабаровск: Кн. изд-во, 1977. 191 с.

Senchukova G.V., Kormilitsyna A.M., Ganenko I.G. et al. *The Green Outfit of the City* (*Landscaping of Settlements in the Far East*). Foreword by V.T. Chumin. Khabarovsk, Khabarovsk Publ. House, 1977. 191 p. (In Russ.).

25. *Соловьева И.А., Нечаев А.А., Грек В.С., Морин В.А.* Дендрарий ДальНИИ лесного хозяйства: современное состояние и проблемы охраны // Роль зеленых насаждений в стратегии развития Хабаровска: материалы III гор. науч.-практ. конф. Хабаровск: ТОГУ, 2007. С. 64–68.

Solovieva I.A., Nechaev A.A., Grek V.S., Morin V.A. The Arboretum of the Far East Forestry Research Institute: Current State and Protection Problems. *The Role of Green Spaces in the Development Strategy of Khabarovsk*: Materials of the 3rd City Scientific and Practical Conference. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2007, pp. 64–68. (In Russ.).

26. Хабаровск: геогр. атлас. М.: Гл. упр. геодезии и картографии при Совете Министров СССР. М.: ГУГК, 1989. 63 с.

Khabarovsk: Geographic Atlas. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1989. 63 p. (In Russ.).

27. Хабаровскстат: офиц. сайт. Режим доступа: https://27.rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 25.10.24).

Khabarovskstat: Official Web-Site. (In Russ.).

28. *Чистякова А.А., Заугольнова Л.Б., Полтинкина И.В., Кутьина И.С., Лащинский Н.Н.* Диагнозы и ключи возрастных состояний лесных растений. Деревья и кустарники / под ред. О.В. Смирновой. М.: Изд-во «Прометей» МГПИ им. В.И. Ленина, 1989. Ч. I. 102 с.

Chistyakova A.A., Zaugol'nova L.B., Poltinkina I.V., Kut'ina I.S., Lashchinskij N.N. *Diagnoses and Keys of Age-Related Conditions of Forest Plants. Trees and Shrubs.* Ed. by. O.V. Smirnova. Moscow, Prometej Publ, Moscow State Pedagogical Institute named after V.I. Lenin Publ., 1989, part 1. 102 p. (In Russ.).

29. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем / ред.-сост. Е.Н. Букварева, Д.Г. Замолодчиков. М.: Центр охраны дикой природы, 2016. 148 с.

Ecosystem Services in Russia: Prototype of the National Report. Vol. 1. Terrestrial Ecosystem Services. Comp. eds. E.N. Bukvareva, D.G. Zamolodchikov. Moscow, Wildlife Conservation Centre, 2016. 148 p. (In Russ.).

30. Bastian O., Haase D., Grunewald K. Ecosystem Properties, Potentials and Services – The EPPS Conceptual Framework and an Urban Application Example. *Ecological Indicators*, 2012, vol. 21, pp. 7–16. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.014

31. Cowett F.D., Bassuk N. Street Tree Diversity in Three Northeastern U.S. States. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 2017, vol. 43, iss. 1, pp. 1–14. https://doi.org/10.48044/jauf.2017.001

32. Ghafari S., Kaviani B., Sedaghathoor Sh., Allahyari M.S. Ecological Potentials of Trees, Shrubs and Hedge Species for Urban Green Spaces by Multi Criteria Decision Making. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, vol. 55, art. no. 126824. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126824

33. Green Infrastructure. *United States Environmental Protection Agency*. Available at: https://www.epa.gov/green-infrastructure (accessed 02.04.22).

34. Gunnarsson B., Knez I., Hedblom M., Ode Sang Å. Effects of Biodiversity and Environment-Related Attitude on Perception of Urban Green Space. *Urban Ecosystems*, 2016, vol. 20, pp. 37–49. https://doi.org/10.1007/s11252-016-0581-x

35. Hernandez J.G.V., Pallagst K., Hammer P. Urban Green Spaces as a Component of an Ecosystem Functions, Services, Users, Community Involvement, Initiatives and Actions. *International Journal Environmental Sciences & Natural Resources*, 2018, vol. 8 , iss. 1, art. no. 555730. https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.08.555730

36. Kinzig A.P., Warren P., Martin C., Hope D., Katti M. The Effects of Human Socioeconomic Status and Cultural Characteristics on Urban Patterns of Biodiversity. *Ecology & Society*, 2005, vol. 10, no. 1, art. no. 23. https://doi.org/10.5751/ES-01264-100123

37. McKinney M.L. Urbanization, Biodiversity, and Conservation: The Impacts of Urbanization on Native Species are Poorly Studied, but Educating a Highly Urbanized Human Population about These Impacts Can Greatly Improve Species Conservation in All Ecosystems. *BioScience*, 2002, vol. 52, iss. 10, pp. 883–890. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2

38. Robrecht H., Lorena L., Mader A.D., Calcaterra E., Nel J., Hammerl M., Moola F., Ludlow D., Wackernagel M., Teller A. Ecosystem Services in Cities and Public Management. *TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Local and Regional Policy Makers*, 2010, pp. 65–80.

39. Sjöman H., Hirons A.D., Bassuk N.L. Urban Forest Resilience through Tree Selection – Variation in Drought Tolerance in *Acer*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, vol. 14, iss. 4, pp. 858–865. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.004

40. Trzyna T., Edmiston J.T., Hyman G., McNeely J.A., e Menezes P. da C., Myrdal B., Phillips A. *Urban Protected Areas: Profiles and Best Practice Guidelines*. Switzerland, Gland, IUCN, Best Practice Protected Area Guidelines. Series no. 22, 2014. 110 p.

41. *2018 Revision of World Urbanization Prospects*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. Available at: http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm (accessed 24.08.22).

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

Научная статья
УДК 630*581.4
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-121-132

Особенности структуры черничных ельников Большого Соловецкого острова

А.Н. Соболев*[1], *канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.;
ResearcherID: AAS-3366-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7961-8318
П.А. Феклистов*[2]✉, *д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: AAC-2377-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8226-893X*
И.Н. Болотов*[2], *д-р биол. наук; *ResearcherID: P-2892-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3878-4192*
С.С. Макаров*[3], *д-р с.-х. наук; *ResearcherID: AAK-9829-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0564-8888*
О.Н. Тюкавина*[4], *д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: H-2336-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4024-6833*
Ж.А. Бруева*[4], *аспирант; *ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9177-1316*
[1]Соловецкий музей-заповедник, пос. Соловецкий, Приморский р-н, Архангельская обл., Россия, 164070; alex-sobol@mail.ru
[2]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 109, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru✉, dirnauka@fciarctic.ru
[3]Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; s.makarov@rgau-msha.ru
[4]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru, bruevazh@bk.ru

Поступила в редакцию 18.05.23 / Одобрена после рецензирования 13.08.23 / Принята к печати 15.08.23

Аннотация. Исследование выполнено в самых типичных и наиболее распространенных для Большого Соловецкого острова насаждениях – в черничных ельниках. Использованы лесоустроительные материалы и данные, полученные на пробных площадях. На последних, а также в их буферных зонах были замерены диаметры и высоты у 325 учетных деревьев и взяты керны для изучения возрастной структуры древостоев. В составе черничных ельников установлено присутствие всех лесообразующих пород острова. Средний породный состав отражается формулой 6Е2Б1С1Ос. Преобладают (76 %) древостои с полнотой 0,6–0,7, но в то же время значительную долю составляют и низкополнотные насаждения – 21 %, почти отсутствуют высокополнотные. На Соловках, согласно архивным данным, сплошные рубки не проводились, за исключением отдельных вырубок в 20–30-е гг. XX в. при существовании здесь Соловецкого лагеря особого назначения. Все это, казалось бы, должно способствовать сохранению высоковозрастных деревьев. Однако средний возраст еловых древостоев составляет 155 лет, а самые старые доживают до 250 лет. Этот возраст можно считать предельным для условий Соловецкого архипелага. Показано, что все древостои разновозрастные с различным распределением деревьев по классам возраста. Встречаются черничные ельники со значительным промежутком между поколениями деревьев, а также с цикличностью

© Соболев А.Н., Феклистов П.А., Болотов И.Н., Макаров С.С., Тюкавина О.Н., Бруева Ж.А., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

в появлении максимального количества деревьев в определенные периоды. Выявлены следующие типы возрастной структуры: абсолютно-разновозрастные, ступенчато-разновозрастные и циклично-разновозрастные. Деревья ели, как было установлено, достаточно хорошо растут по диаметру, но рост в высоту заторможен, в результате формируются сильносбежистые стволы. В среднем максимальной высоты – около 20 м – деревья достигают при диаметре 30–40 см. Относительная высота составляет в среднем 0,66 м/см – это 67 % от показателя материковых ельников. Она находится в обратной зависимости от диаметра: чем он выше, тем ниже относительная высота.

Ключевые слова: ельники черничные, еловый древостой, диаметр древостоя, высота древостоя, возрастная структура древостоя, относительная высота в древостое, Большой Соловецкий остров, Соловки

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН (№ FUUW-2024-0011).

Для цитирования: Соболев А.Н., Феклистов П.А., Болотов И.Н., Макаров С.С., Тюкавина О.Н., Бруева Ж.А. Особенности структуры черничных ельников Большого Соловецкого острова // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 121–132. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-121-132

Original article

Features of the Structure of Blueberry Spruce Forests of Bolshoy Solovetsky Island

Aleksandr N. Sobolev*[1]*, *Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist; ResearcherID: AAS-3366-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7961-8318*
Pavel A. Feklistov*[2]✉*, *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: AAC-2377-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8226-893X*
Ivan N. Bolotov*[2]*, *Doctor of Biology; ResearcherID: P-2892-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3878-4192*
Sergey S. Makarov*[3]*, *Doctor of Agriculture; ResearcherID: AAK-9829-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0564-8888*
Olga N. Tyukavina*[4]*, *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: H-2336-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4024-6833*
Zhanna A. Brueva*[4]*, *Postgraduate Student; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9177-1316*
[1]Solovki Museum-Reserve, Solovetsky Settlement, Primorsky District, Arkhangelsk Region, 164070, Russian Federation; alex-sobol@mail.ru
[2]Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru✉, dirnauka@fciarctic.ru
[3]Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; s.makarov@rgau-msha.ru
[4]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.tukavina@narfu.ru, bruevazh@bk.ru

Received on May 18, 2023 / Approved after reviewing on August 13, 2023 / Accepted on August 15, 2023

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Abstract. The research has been carried out in the most typical and widespread plantations for Bolshoy Solovetsky Island – in blueberry spruce forests. Forest management materials and data obtained from sample plots have been used. In the latter, as well as in their buffer zones, the diameters and heights of 325 registered trees have been measured and samples have been taken to study the age structure of the stands. The presence of all forest-forming species of the island has been established in the composition of blueberry spruce forests. The average breed composition is reflected by the formula: 6S2B1P1As (6 spruce trees, 2 birch trees, 1 pine tree, and 1 aspen tree). The majority (76 %) of stands is of 0.6–0.7 density, but at the same time, low-density stands also make up a significant proportion – 21 %, and high-density stands are almost absent. According to archival data, there have been no clear-cuttings on the Solovetsky Islands, with the exception of individual cuttings in the 1920s and 1930s when the Solovetsky Special Purpose Camp existed there. All this, it would seem, has to contribute to the preservation of old trees. However, the average age of spruce stands is 155 years, and the oldest live up to 250 years. This age can be considered the limit for the conditions of the Solovetsky Archipelago. It has been shown that all the stands are of different ages with a different distribution of trees by age classes. There are blueberry spruce forests with a significant gap between tree generations, as well as with a cyclical appearance of the maximum number of trees in certain periods. The following types of age structure have been identified: absolutely uneven-age, stepwise uneven-age and cyclically uneven-age. Spruce trees have been found to grow quite well in diameter, but growth in height is inhibited, resulting in the formation of highly tapering trunks. On average, the trees reach their maximum height of about 20 m with a diameter of 30–40 cm. The relative height averages 0.66 m/cm – this is 67 % of the indicator of the mainland spruce forests. It is inversely related to the diameter: the greater it is, the lower is the relative height.

Keywords: blueberry spruce forests, spruce stand, stand diameter, stand height, stand age structure, relative height in the stand, Bolshoy Solovetsky Island, the Solovetsky Islands

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (no. FUUW-2024-0011).

For citation: Sobolev A.N., Feklistov P.A., Bolotov I.N., Makarov S.S., Tyukavina O.N., Brueva Z.A. Features of the Structure of Blueberry Spruce Forests of Bolshoy Solovetsky Island. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 121–132. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-121-132

Введение

Соловецкий архипелаг называют жемчужиной Белого моря. Он известен в большей мере историческими событиями, связанными с его освоением. Соловецкие острова являются объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. В то же время интересны и важны леса, формирующие облик архипелага. Они отнесены к защитным, имеющим научное или историческое значение. На данной территории произрастают изолированные популяции древесных пород, т. к. она отделена от материка (Онежский п-ов) на 23 км. На формирование лесов, их биологического разнообразия накладывали отпечаток бессистемные рубки, климатические факторы, связанные с расположением островов в Белом море, антропогенный пресс – посещение исторических и природных объектов туристами [23].

Одной из наиболее значимых древесных пород является ель. Именно на долю ельников приходится бóльшая часть покрытой лесом площади Соловецкого архипелага. В то же время особенности ельников на этой территории изучены недостаточно. В частности, остается малоисследованной их возрастная структура. О значительной роли возрастной структуры в жизни и биологической устойчивости древостоев писал еще Г.Ф. Морозов [13]. Возрастная

структура в значительной степени определяет морфологическое строение лесных сообществ и отражает условия и историю их формирования и развития [6]. Недостаточно изучены коррелятивные ростовые процессы, соотношение роста по диаметру и высоте, их взаимосвязь в островных условиях [12].

Сведения о лесах Соловецкого архипелага содержатся в литературе [1, 5, 18]. Они далеко не исчерпывают всех вопросов особенностей древостоев и природопользования [24].

Цель – выявление особенностей черничных ельников Большого Соловецкого острова.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на Большом Соловецком острове, где были заложены пробные площади в разных, но типичных для архипелага по составу, возрасту и классу бонитета черничных ельниках (табл. 1). Поскольку это, как правило, смешанные насаждения с преобладанием ели, то приведены характеристики и сопутствующих пород.

Таблица 1

Таксационная характеристика черничных ельников Большого Соловецкого острова
The inventory characteristics of blueberry stands of Bolshoy Solovetsky Island

ПП	Состав	Средние		Полнота		Класс возраста	Бонитет	Запас, м³/га
		диаметр, см	высота, м	абсолютная, м²/га	относительная			
6	6Е2Б2Ос+С	17,9	16,2	13,6	0,45	VII	V	111
		19,2	17,2	4,9	0,18			41
		28,2	22,0	4,0	0,14			56
		40,0	23,5	0,7	0,02			8
7	7Е2Б1ОС	19,7	12,9	12,3	0,49	IV	V	83
		15,4	–	4,4	–			–
		17,1	–	1,5	–			–
8	7Е1ОС1С1Б	21,1	16,2	15,7	0,52	VII	V	128
		14,0	12,6	2,1	0,09			14
		16,9	16,6	2,7	0,09			25
		29,4	21,2	2,0	0,05			20
9	8Е1Б1ОС	23,4	18,5	24,1	0,71	VI	IV	220
		18,8	18,3	4,8	0,17			42
		17,7	18,9	3,5	0,12			38
10	9Е1Б+ОС	21,8	16,2	20,9	0,69	IX	V	171
		16,5	11,7	2,0	0,10			12
		16,3	14,8	0,9	0,03			7

Примечание: Здесь и в табл. 2 ПП – пробная площадь.

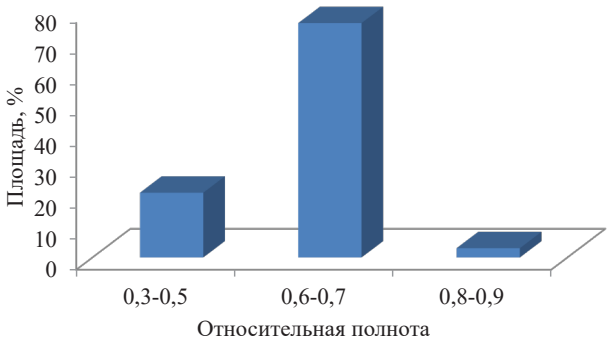
При закладке пробных площадей руководствовались ранее опубликованными рекомендациями [1, 17]. Для измерений использовали традиционные инструменты: мерную вилку, высотомер (Suunto), возрастной бурав и др. Установление высот и диаметров производилось у 15–16 учетных елей на каждой пробной площади, а также в буферной зоне у 245 деревьев (вокруг пробных площадей), таким образом, всего было замерено 325 учетных деревьев ели. Под буферной зоной понимали прилегающую по периметру пробной площади часть изучаемого выдела, на которой могут проводиться измерения без влияния на данные самой пробной площади.

Результаты исследования и их обсуждение

Леса Соловецкого архипелага представлены в основном хвойными насаждениями. На долю еловых приходится более всего – 42 % его покрытой лесом площади. Преобладают черничные ельники – 89,2 % покрытой еловым лесом площади [18]. По породному составу они отличаются от материковых древостоев северной тайги Архангельской области, но незначительно. По данным последнего лесоустройства (2003 г.), средний породный состав отражается формулой 6Е2Б1С1Ос. Преобладают (76 %) древостои (рис. 1) с полнотой 0,6–0,7, значительную долю составляют и низкополнотные – 21 %, почти отсутствуют высокополнотные. Наличие низкополнотных древостоев – одна из особенностей соловецких лесов. В таких древостоях крона опускается до земли и имеет место вегетативное размножение, кода нижние ветви укореняются, что подтверждают наши натурные наблюдения.

Рис. 1. Распределение площади ельников Большого Соловецкого острова по полноте

Fig. 1. The distribution of the area of spruce forests of Bolshoy Solovetsky Island by density



Для более детального исследования ельников в характерных по породному составу и полноте древостоях были заложены пробные площади (см. табл. 1). На Соловках, согласно архивным данным, сплошные рубки почти отсутствовали, отдельные вырубки проведены в 20–30-е гг. XX в. во время развития хозяйства Соловецкого лагеря особого назначения. При этом средний возраст еловых древостоев составляет 155 лет. Если посмотреть по классам возраста, то наиболее значимые группы древостоев – 100–200 лет (здесь и далее речь идет о возрасте только ели, другие породы не изучались) (рис. 2). Возникает проблема малой представленности высоковозрастных древостоев: их почти нет. Известны лишь несколько выделов с древостоями от 230 до 250 лет. Такие ельники

находятся на Большом Соловецком острове в районе оз. Поднебесное – 250 лет, севернее мыса Толстик – 230 лет, а также чуть севернее оз. Херт – 230 лет. Следовательно, продолжительность жизни ели в условиях Соловецкого архипелага определяется примерно 250 годами.

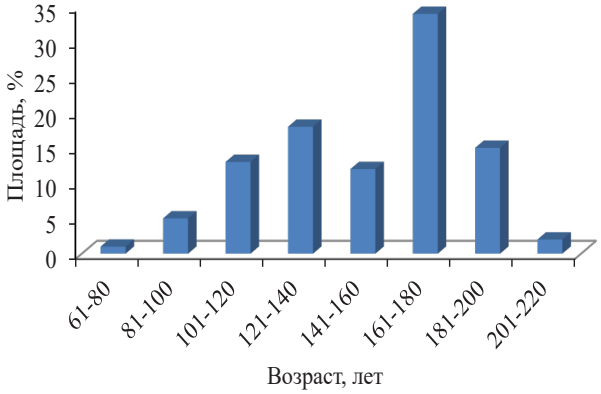


Рис. 2. Распределение площади ельников Большого Соловецкого острова по возрастным группам

Fig. 2. The distribution of the area of spruce forests of Bolshoy Solovetsky Island by age groups

Более детально рассматривая возрастную структуру черничных ельников на Соловках, можно констатировать, что все такие древостои являются разновозрастными. По данным И.И. Гусева [3], разновозрастные насаждения составляют всего 24 % от насаждений северной подзоны тайги и на 65 % площади преобладают условно-разновозрастные. Если обратиться к классификации Г.Е. Комина [6], то можно отметить разные виды возрастной структуры: это и абсолютно-разновозрастная, и ступенчато-разновозрастная, и циклично-разновозрастная (табл. 2). На пробных площадях 8 и 10 существует разрыв в поколениях, поэтому они, согласно классификации Г.Е. Комина, отнесены к ступенчато-разновозрастным, а на пробной площади 9 зафиксированы максимумы в количестве деревьев 61–80 и 101–140 лет, соответственно, данные древостои относятся к циклично-разновозрастным. На пробных площадях наблюдается разный возрастной «разлет», предположительно, это связано с рубками, которые в прошлом проводились на острове. Изменчивость ели по возрасту на пробных площадях колеблется от 16 до 35 %, в среднем составляет 29 %. Это во многом согласуется с данными по другим регионам. В частности, по ельникам Севера, для которых И.И. Гусев приводил цифры 22–44 % [3], и Крайнего Севера – 28 % [19]. В то же время есть и иные сведения: Б.А. Семенов [15] для притундровых ельников обозначает цифру возрастной изменчивости 48–50 %. Интересно, что в Печорском бассейне показатель составляет всего 9–17 % [11].

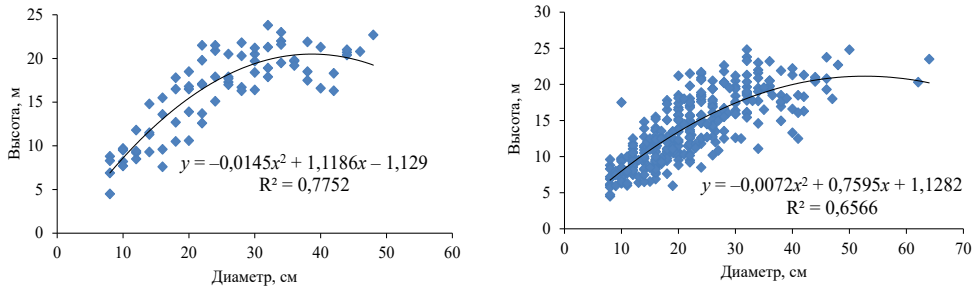
Взаимосвязь диаметра и высоты для различных древесных пород широко известна. На знании этой взаимосвязи основывается большинство лесотаксационных таблиц для различных регионов страны. Однако существуют особенности по породам и регионам, поэтому выявление такой связи для отдельных пород по-прежнему актуально. Например, в последние годы появились публикации по соснякам [2, 4, 7, 10, 16], березовым насаждениям [8, 9]. Вопрос актуален и в целом для лесов мира [20–22, 25–27]. Для ельников, которые чаще всего являются разновозрастными, это также значимо, но представляет определенные трудности.

Таблица 2

Возрастная структура черничных ельников Большого Соловецкого острова
The age structure of blueberry spruce forests of Bolshoy Solovetsky Island

ПП	Возрастная структура	Наличие деревьев разного возраста		Средний возраст, лет	Коэффициент изменчивости, %
		Возраст, лет	Количество, %		
6	Абсолютно-разновозрастные	100–180	100	136,2±4,85	15,9
7		40–140	100	80,0±5,77	32,3
8	Ступенчато-разновозрастные	61–100 141–200	35 65	133,8±10,61	32,7
9	Циклично-разновозрастные	60–200	100	114,0±3,37	29,9
10	Ступенчато-разновозрастные	81–160 181–260	53 47	175,6±14,10	35,0

На это, в частности, указывает тот факт, что в последнем справочнике [14] есть подробные таблицы хода роста по соснякам – и по бонитетам, и по типам леса, и по подзонам тайги, а по ельникам таблиц почти нет (1 таблица для одновозрастных ельников). При этом черничные ельники на Большом Соловецком острове существенно отличаются от материковых по многим параметрам [18]. В связи с этим был выполнен анализ для ели по отдельным пробным площадям и выяснено, что закономерности везде очень близки, несмотря на некоторые отличия древостоев по составу, возрасту и полноте. Это дало основание обобщить все данные для указанного вида по пробным площадям (рис. 3, *а*). В данные включены и измерения, выполненные в буферной зоне, таким образом, получены сведения в целом для типа леса – ельника черничного (рис. 3, *б*).



а *б*

Рис. 3. Взаимосвязь диаметра и высоты деревьев ели на Большом Соловецком острове: *а* – для пробных площадей; *б* – для типа леса (ельник черничный)

Fig. 3. The relationship between the diameter and height of spruce trees on Bolshoy Solovetsky Island: *а* – for the sample plots; *б* – for the forest type (blueberry spruce forest)

На рис. 3 виден разброс точек для большой и самой большой высот (20 м) при диаметре от 30 см и выше. В целом, по данным обоих графиков, высота увеличивается лишь до диаметра 8–30 см, а затем почти не меняется.

Важным и интересным является показатель относительной высоты в ельниках Соловков. Он отражает, насколько увеличивается высота на каждый сантиметр диаметра, т. е. пропорции роста деревьев, или ростовые корреляции. Кроме этого, относительная высота косвенно характеризует сбежистость деревьев – качество стволов. Группирование деревьев ели по ступеням высоты свидетельствует о его подчинении закону нормального распределения (рис. 4). Наибольшее количество деревьев ели (63 %) имеет относительную высоту 0,5–0,7 м/см.

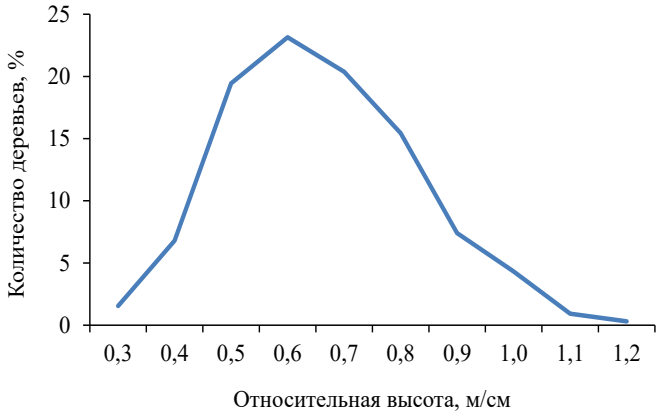


Рис. 4. Количество деревьев ели с разной относительной высотой на Большом Соловецком острове

Fig. 4. The number of spruce trees with different relative heights on Bolshoy Solovetsky Island

Средняя относительная высота для ели равна 0,66±0,01 м/см, что говорит об увеличении высоты на 0,66 м на каждый сантиметр диаметра. Интересно, что средневзвешенная величина также составляет 0,66 м/см. В свою очередь, относительная высота в северной подзоне тайги на материке, согласно расчетам по полевому справочнику таксатора [14], равняется 0,98 м/см. Таким образом, относительная высота ели на Соловках – 67 % относительной высоты насаждений на материке.

Относительная высота в значительной степени зависит от диаметра, и эта связь обратная: чем выше диаметр, тем меньше относительная высота (табл. 3). Коэффициенты корреляции достаточно высокие и достоверны при уровне значимости 0,05. На разных пробных площадях они колеблются от –0,59 до –0,88.

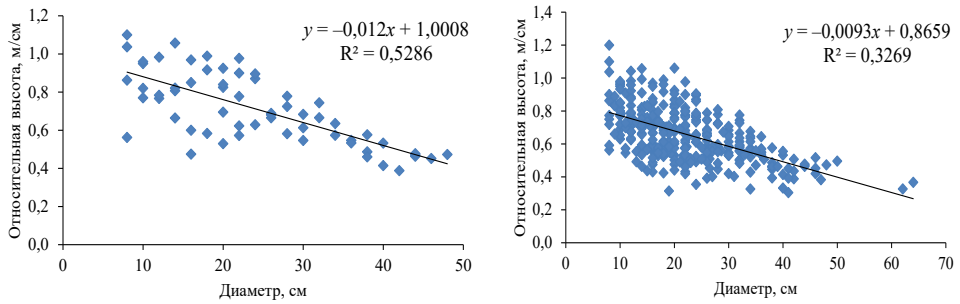
Таблица 3

Зависимость относительной высоты от диаметра деревьев ели на Большом Соловецком острове
The dependence of relative height on diameter of the spruce trees on Bolshoy Solovetsky Island

ПП	Коэффициент корреляции	Ошибка	Достоверность (критерий Стьюдента)
6	–0,88	0,06	14,6
7	–0,77	0,10	7,7
9	–0,87	0,06	14,4
10	–0,59	0,09	6,6

Зависимость относительной высоты от диаметра проявляется и на отдельных пробных площадях по данным 15–16 учетных деревьев, и при обобщении в целом для пробных площадей (рис. 5, *а*). При использовании данных замеров

диаметров и высот на пробных площадях с учетом показателей для буферной зоны пробных площадей (325 учетных деревьев) получили зависимость для типа леса в целом (рис. 5, *б*). Все это свидетельствует о том, что с увеличением диаметра деревьев скорость роста в высоту резко падает вследствие негативного воздействия экологических факторов в условиях арктических островов. То есть могут образовываться достаточно большие по диаметру деревья, но с пониженной высотой, приземистые. Формируются сильносбежистые деревья, и чем толще ствол, тем сильнее сбежистость.



а *б*

Рис. 5. Зависимость относительной высоты от диаметра деревьев ели на Большом Соловецком острове: *а* – для пробных площадей; *б* – для типа леса (ельник черничный)

Fig. 5. The dependence of relative height on spruce tree diameter on Bolshoy Solovetsky Island: *а* – for the sample areas; *б* – for the forest type (blueberry spruce forest)

Выводы

1. Черничные ельники Большого Соловецкого острова имеют в составе значительную примесь березы, осины и сосны.

2. Преобладают среднеполнотные ельники, но также значительно количество низкополнотных древостоев.

3. Все черничные ельники Большого Соловецкого острова являются разновозрастными. Встречаются абсолютно-разновозрастные, ступенчато-разновозрастные, циклично-разновозрастные.

4. Максимальная высота в изученных ельниках – около 20 м, такой высоты деревья достигают при диаметре 30–40 см.

5. Относительная высота составляет в среднем 0,66 м/см, это 67 % от показателя материковых ельников.

6. Относительная высота имеет обратную зависимость от диаметра: чем он выше, тем ниже относительная высота. При диаметре 30 см относительная высота равняется 0,6 м/см.

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*. 5th ed., enlarged. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).

2. *Гурьянов М.О., Раупова Д.Э.* Исследование взаимосвязи высот и диаметров на высоте груди в древостоях сосны обыкновенной Учебно-опытного лесничества Ленинградской области // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2021. Вып. 237. С. 6–15.

Guryanov M.O., Raupova D.E. A Study of the Relationship between Heights and Diameters at Breast Height in Tree Stands of Scots Pine in the Training and Experimental Forestry of the Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2021, iss. 237, pp. 6–15. (In Russ.).

3. *Гусев И.И.* Продуктивность ельников Севера. Л: ЛГУ, 1978. 232 с.

Gusev I.I. *Productivity of Northern Spruce Forests*. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1978. 232 p. (In Russ.).

4. *Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В.* Модель смешанных эффектов зависимости высот от диаметров деревьев в сосновых древостоях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2021. Вып. 237. С. 59–74.

Dubenok N.N., Kuzmichev V.V., Lebedev A.V. Model of Mixed Effects of Height Dependence on Tree Diameters in Pine Stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2021, iss. 237, pp. 59–74. (In Russ.).

5. *Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В.* Леса Соловецкого архипелага. Архангельск: СОЛТИ, 2009. 244 с.

Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prourzin L.I., Torkhov S.V. *Forests of the Solovetsky Archipelago*. Arkhangelsk, SOLTI Publ., 2009. 244 p. (In Russ.).

6. *Комин Г.Е.* Возрастная структура древостоев в лесах России. Сочи: НИИгорлесэкол, 2003. 219 с.

Komin G.E. *The Age Structure of Stands in the Forests of Russia*. Sochi, Federal State Institution Research Institute of Mountain Forestry and Forest Ecology, 2003. 219 p. (In Russ.).

7. *Кутявин И.Н., Манов А.В., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А.* Строение древостоев северотаежных сосняков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 86–105.

Kutyavin I.N., Manov A.V., Osipov A.F., Kuznetsov M.A. Stand Structure of Northern Taiga Pine Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 2, pp. 86–105. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-86-105

8. *Лебедев А.В., Кузьмичев В.В.* Верификация трехпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди для березовых древостоев европейской части России // Сиб. лесн. журн. 2020. № 5. С. 45–54.

Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Verification of Three-Parameter Models of Dependence of Height on the Diameter at Breast Height for Birch Stands of the European Part of Russia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2020, no. 5, pp. 45–54. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/SJFS20200505

9. *Лебедев А.В., Кузьмичев В.В.* Проверка двухпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди в березовых древостоях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2020. Вып. 230. С. 100–113.

Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Verification of Bi-Parameter Models of Dependence Diameter on Breast Height in Birch Stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehniceskoj akademii*, 2020, iss. 230, pp. 100–113. (In Russ.).

10. *Лебедев А.В., Кузьмичев В.В.* Таксационные показатели сосновых древостоев по данным долговременных наблюдений // Сиб. лесн. журн. 2023. № 2. С. 3–16.

Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Forest Survey Parameters of Pine Tree Stands According to Long-Term Observation Data. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2023, no. 2, pp. 3–16. (In Russ.).

11. *Манов А.В.* Структура, динамика роста и продуктивность древостоев притундровых ельников Печорского бассейна: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2009. 18 с.

Manov A.V. *Structure, Growth Dynamics and Productivity of Forest Stands of Tundra Spruce Forests of the Pechora Basin:* Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2009. 18 p. (In Russ.).

12. *Мелехов И.С.* Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.

Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).

13. *Морозов Г.Ф.* Учение о лесе. 7-е изд. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 455 с.

Morozov G.F. *The Doctrine of the Forest*. 7th ed. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1949. 455 p. (In Russ.).

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

Field Forest Inventory Guide. Under the general editorship by S.V. Tretyakov, S.V. Yaroslavtseva, S.V. Kopteva. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2016. 252 p. (In Russ.).

15. *Семенов Б.А.* Особенности роста, строения и возобновления притундровых ельников // Проблемы притундрового лесоводства: сб. ст., посвящ. памяти акад. РАСХН, д-ра с.-х. наук, проф., заслуж. деятеля науки России Ивана Степановича Мелехова. Архангельск: Правда Севера, 1995. С. 30–41.

Semenov B.A. Features of Growth, Structure and Renewal of Tundra Spruce Forests. *Problems of Tundra Forestry*: Collection of Articles Dedicated to the Memory of Academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Professor, Honored Scientist of Russia Ivan Stepanovish Melekhov. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 1995, pp. 30–41. (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. *Третьяков С.В., Коптев С.В., Наквасина Е.Н., Бахтин А.А., Ильинцев А.С., Богданов А.П., Кекишева Ю.Е.* Лесная таксация. Ч. 4. Закладка, таксация и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ. Архангельск: САФУ, 2023. 19 с.

Tretyakov S.V., Koptev S.V., Nakvasina E.N., Bakhtin A.A., Il'intsev A.S., Bogdanov A.P., Kekisheva Yu.E. *Forest Inventory*. Part 4. Laying, Inventory and Description of Sample Plots during Scientific Research and Preparation of Final Qualifying Works. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2023. 19 p. (In Russ.).

18. *Феклистов П.А., Соболев А.Н.* Лесные насаждения Соловецкого архипелага (структура, состояние, рост): моногр. Архангельск: САФУ, 2010. 201 с.

Feklistov P.A., Sobolev A.N. *Forest Plantations of the Solovetsky Archipelago* (*Structure, Condition, Growth*). Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2010. 201 p. (In Russ.).

19. *Ярославцев С.В.* Строение и продуктивность ельников Крайнего Севера // Проблемы лесовыращивания на Европейском Севере: сб. науч. работ. Архангельск, 1999. С. 93–94.

Yaroslavtsev S.V. Structure and Productivity of Spruce Forests in the Far North. *Problems of Forest Cultivation in the European North*: Collection of Scientific Works. Arkhangelsk, 1999, pp. 93–94. (In Russ.).

20. Buford M.A. Height-Diameter Relationships at Age 15 in Loblolly Pine Seed Sources. *Forest Science*, 1986, no. 32, iss. 3, pp. 812–818. https://doi.org/10.1093/forestscience/32.3.812

21. Curtis R.O. Height-Diameter and Height-Diameter-Age Equations for Second-Growth Douglas-Fir. *Forest Science*, 1967, vol. 13, iss. 4, pp. 365–375. https://doi.org/10.1093/forestscience/13.4.365

22. El Mamoun H.O., El Zein A.I., El Mugira M.I. Modelling Height-Diameter Relationships of Selected Economically Important Natural Forests Species. *Journal of Forest Products & Industries*, 2013, no. 2(1), pp. 34–42.

23. Kärkkäinen L., Kurttila M., Salminen O., Viiri H. Effects of Energy Wood Harvesting on Timber Production Potential and Biological Diversity in North Karelia, Finland. *Forest science*, 2014, vol. 60. iss. 6, pp. 1077–1088. https://doi.org/10.5849/forsci.13-041

24. Larsen J.B., Nielsen A.B. Nature-Based Forest Management. Where are We Going? Elaborating Forest Development Types in and with Practice. *Forest Ecology Management*, 2077, vol. 238, iss. 1–3, pp. 107–117. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.087

25. Näslund M. Antalet Provträd och Höjdkurvans Noggrannhet. *Meddelanden fran Statens Skogsforskingsinstitut*, 1929, no. 25, pp. 93–170. (In Swed.).

26. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2009. 664 p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4

27. Staudhammer C., LeMay V. Height Prediction Equations Using Diameter and Stand Density Measures. *The Forestry Chronicle*, 2000, vol. 76, no. 2, pp. 303–309. https://doi.org/10.5558/tfc76303-2

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

Original article
УДК 630*231
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-133-146

Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests

Vera A. Savchenkova ✉, ***Doctor of Agriculture;*** *ResearcherID: Y-3167-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8593-7887*
Sergey B. Vasilyev, Candidate of Agriculture; *ResearcherID: C-7390-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4063-7041*
Vladimir F. Nikitin, Candidate of Agriculture;
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0861-5718
Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; v9651658826@yandex.ru ✉, svasilyev@mgul.ac.ru, forestmaster@yandex.ru

Received on April 30, 2023 / Approved after reviewing on August 2, 2023 / Accepted on August 3, 2023

Abstract. The article is devoted to the problem of restoration of cut down forests in the forest area of coniferous-broad-leaved (mixed) forests of the centre of the European part of Russia. Due to the intensive use of forest resources, in order to rationally plan their restoration, there is a need for systematic assessment of the natural and artificial restoration of the main forest-forming species. For areas with a developed network of transport routes, the problem of deterioration of the species composition of forests, as well their qualitative condition as a result of prolonged and intensive forest exploitation is currently increasing. This has determined the purpose of the study, which has been carried out through a field survey of undergrowth and forest planations of forest-forming species according to the methodology by A.V. Pobedinsky and the standard methodology for undergrowth inventory. Young stands of natural (undergrowth) and artificial (created by planting) origin in coniferous-broad-leaved (mixed) forests of the European part of Russia after clear-cutting of trees have become the object of the study. An analysis of the structre of production and demand (according to the survey data) has shown that preference is given to harvesting birch (40 % of the volume cut down). The results of comparing the growth characteristics of the younger generation of tree species, taking into account the age and density of their growth, has allowed us to conclude that the undergrowth adapts easier and faster mainly to the growing conditions B_4, B_3, C_3, C_4, A_4, A_3, and occasionally B_2, compared to forest plantations. In many cases, spruce plantations created by planting in the bottom of a furrow are completely destroyed (get soaked) or remain in a volume that does not provide satisfactory reforestation. Cases of exposure of the root system of spruce plantations at the age of 22, which have been created by planting in the dump, have been revealed. Based on experimental data, it has been established that productive young stands of natural origin are successfully formed in the forest area of coniferous-broad-leaved (mixed) forests of the Yaroslavl, Moscow and Nizhny Novgorod Regions. Criteria for the inventory of undergrowth and young growth of soft-wooded broad-leaved species have been proposed. Proposals have been developed to improve the efficiency of reforestation measures in forest-growing conditions corresponding to the A_4, B_4, C_4, as well as in the A_3, B_3 and C_3 conditions. The positive effect of raspberries on self-seeding of the main forest-forming species has been noted. The self-sown plants in such areas is 1.0–1.5 thousand pcs/ha.

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Keywords: undergrowth, underwood, forest plantations, natural young stands, reforestation, forest vegetation features, coniferous-broadleaved forests

For citation: Savchenkova V.A., Vasilyev S.B., Nikitin V.F. Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 133–146. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-133-146

Научная статья

Особенности восстановления хвойно-широколиственных лесов

В.А. Савченкова✉***,*** *д-р с.-х. наук; ResearcherID: Y-3167-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8593-7887*
С.Б. Васильев, *канд. с.-х. наук; ResearcherID: C-7390-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4063-7041*
В.Ф. Никитин, *канд. с.-х. наук; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0861-5718*
Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; v9651658826@yandex.ru✉, svasilyev@mgul.ac.ru, forestmaster@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.04.23 / Одобрена после рецензирования 02.08.23 / Принята к печати 03.08.23

Аннотация. Статья посвящена проблеме восстановления вырубок на территории лесного района хвойно-широколиственных (смешанных) лесов центра европейской части России. Вследствие интенсивного использования лесных ресурсов, в целях рационального планирования их возобновления возникает необходимость систематической оценки естественного и искусственного восстановления основных лесообразующих пород. Для районов с развитой сетью транспортных путей в настоящее время возрастает проблема ухудшения породного состава лесов, а также их качественного состояния в результате длительной и интенсивной лесоэксплуатации. Это и определило цель исследования, которое проводилось путем полевого обследования подроста и лесных культур лесообразующих пород согласно методике А.В. Побединского и стандартной методике учета подроста. Объектом исследования являются молодняки естественного и искусственного (создание лесных культур путем их посадки) происхождения в хвойно-широколиственных (смешанных) лесах европейской части России после сплошных рубок. Анализ структуры производства и спроса (согласно опросным данным) показал, что предпочтение отдается заготовке березы (40 % от вырубаемого объема). Результаты сравнения особенностей роста молодого поколения древесных пород с учетом возраста и густоты их произрастания позволили сделать вывод, что подрост легче и быстрее адаптируется преимущественно к условиям произрастания B_4, B_3, C_4, C_3, A_4, A_3, единично – B_2, по сравнению с лесными культурами. Во многих случаях созданные путем посадки в дно борозды культуры ели полностью погибают (вымокают) или остаются в объеме, не обеспечивающем удовлетворительное лесовосстановление. Выявлены случаи оголения в возрасте 22 лет корневой системы культур ели, которые были созданы посадкой в отвал. На основании экспериментальных данных установлено, что на территории лесного района хвойно-широколиственных (смешанных) лесов Ярославской, Московской и Нижегородской областей успешно формируются продуктивные молодняки естественного происхождения. Предложены критерии учета подроста и молод-

© Савченкова В.А., Васильев С.Б., Никитин В.Ф., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

няка мягколиственных древесных пород. Разработаны рекомендации по повышению эффективности мероприятий по лесовосстановлению в лесорастительных условиях B_4, B_3, C_4, C_3, A_4, A_3. Отмечено положительное влияние малины на самосев основных лесообразующих пород. Количество самосева на таких участках составляет 1,0–1,5 тыс. шт./га.

Ключевые слова: подрост, подлесок, лесные культуры, естественные молодняки, возобновление, лесорастительные особенности, хвойно-широколиственные леса

Для цитирования: Savchenkova V.A., Vasilyev S.B., Nikitin V.F. Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 133–146. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-133-146

Introduction

Today, as a result of natural changes and anthropogenic impact, a significant area covered with coniferous-small-leaved (mixed) forests has formed in the territory of the coniferous-broad-leaved forests of the European part of the Russian Federation (Yaroslavl, Moscow, Nizhny Novgorod Regions).

Such a change of formations can be considered a transitional stage in the restoration of indigenous forest types that were subjected to clear-cutting in the middle of the 20th century using a technology that does not provide for the preservation of undergrowth and young stands of the main stand-forming species. This process has been observed throughout the entire territory of the commercial forests of the European part of Russia. The only difference is the protective forests, untouched by logging in the post-war period. Therefore, a significant volume of annual clear-cutting within the established yield logging site is carried out in plantations dominated by silver birch (*Betula pendula* Roth) (hereinafter referred to as birch) and common aspen (*Populus tremula* L.) (hereinafter referred to as aspen). The second tier of the plantation is formed by Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) (hereinafter referred to as spruce). Downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) [24] is found on soils with excess moisture.

For example, in the territory of the forest fund of the Yaroslavl Region, the volume of mature and overmature birch wood is 573.3 million ha (38.14 % of the volume of all tree species), and aspen – 222.2 million ha (14.78 %). A characteristic feature for the forests of this region is the presence of forest thinners in the plantation (in the second tier, uniform distribution of the predominant spruce species has been noted) with a trunk diameter at a height of 1.3 m up to16 cm and viable undergrowth (the predominant species is spruce distributed unevenly, by groups) in an amount of more than 1.5 thousand pieces per 1 ha in satisfactory condition.

The problem of increasing demand for wood is related to population growth and infrastructure development [25]. An analysis of the structure of production and demand for wood in the study area, according to the survey data, has shown that preference is given to harvesting birch (40 % of the volume cut down). Aspen wood is commonly affected by stem rot, but due to the significant areas with its predominance, the volume of harvesting amounts to 45 % of the total volume of logging. Spruce wood is of poor quality, the effective volume cut is 10–12 %. Scots

pine (*Pinus sylvestris* L.) grows mainly in forest areas belonging to the protective forest category. Sometimes it is cut as part of a mixed plantation, with the volume of harvesting typically accounting for 2–5 % of the total volume of the felled stand.

Analysis of statistical reporting data on the use of wood in the study area has shown that pine (the yield of industrial wood is 80 %) and birch (the yield of industrial wood is up to 90 %) have the highest productivity.

Currently, in the prevailing forest and economic conditions, birch is quite consistent with economic goals. According to the approved Forestry Regulations, which govern activities in the study area, birch is designated as a forest-forming species. However, the Rules for reforestation, form, composition, procedure for approving a reforestation project, grounds for refusing refusal to approve it, as well as requirements for the format of the reforestation project in electronic form, approved by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 12/29/2021 no. 1024, provide for signs that characterize viable undergrowth of only coniferous and hardwood species. The conversion coefficient of small and medium-sized undergrowth into large is determined without taking into account the distinctive features of softwood species. Undergrowth is classified similarly for all tree species according to height, density and distribution over area.

The plantation consists of various components, a change in even one of them leads to a violation of the natural ecological balance. An important unit that makes up a forest phytocenosis is the undergrowth, which reacts to new environmental conditions, for example, after clear-cutting [15, 19, 20, 26].

The urgent task of the development of the forestry sector of Russia is to increase forest productivity, preserve and restore forest biodiversity [2, 5, 16, 17, 19, 23, 28]. At the same time, it is important to establish a rational relationship between artificial and natural reforestation [6, 7, 11, 18, 21, 26].

In this regard, the aim of the study is to assess the growth rates of natural and artificial restoration of forest-forming species in the coniferous-broad-leaved forest area of the central European part of Russia, as well as other components of the plantation, to determine the most effective method of reforestation and the criteria for softwood undergrowth inventory.

Research Objects and Methods

The object of the study is young stands of natural (undergrowth) and artificial (created by planting) origin in coniferous-broad-leaved (mixed) forests of the European part of Russia after clear-cutting of trees.

To achieve the aim, research has been conducted on forest plots with measures taken to promote natural forest regeneration and forest plantations created according to the methodology by A.V. Pobedinsky [13] and the standard methodology for undergrowth inventory.

Plots of 10 m^2 have been laid out at the same distance from each other on the tapes of the layout placed every 50 m. The number of plots has been determined depending on the square of the forest site being surveyed (from 30 to 100 plots in each site). A total of 378 cuttings have been surveyed, ranging in age from 1 to 22 years.

The height, diameter, density of undergrowth and forest plantations of forest-forming species have been measured. Additionally, clear-cut areas up to 50 years old

have been studied to determine the dynamics of the density of the younger generation of the main forest-forming species. An assessment has been made of their distribution over the area of the surveyed sites (according to their occurrence in the registration sites), the completeness of their placement, the degree of soil mineralization and its sodding.

The experimental data obtained have been systematized and combined into homogeneous groups.

Taking into account the self-evident knowledge about the dependence of the growth of forest crops and undergrowth on forest-growing conditions, the species composition of the underwood [4] and living ground cover has been studied.

The density of tree species placement has been determined by the ratio of the sum of the crown projection areas to the area of the site.

The living ground cover has been studied by the method of quadrat sampling (of 1 m^2). Within the sample, raunkiaers (1 × 1 m) have been laid out diagonally at equal distances, on which the entire species composition has been recorded and the coverage, occurrence, abundance, and viability have been determined. The projective covering of a particular species and tier has been considered. The ratio of the projection of the above-ground parts of plants to the total area of the sample plot, taken as 100 %, has been visually taken into account.

In order to determine the difference between the experimental data obtained and the entire general population, the non-sampling error has been calculated and the confidence limits of relative values have been determined [10]. Taking into account the sample size of the experimental data, the kurtosis index (e) has been calculated, indicating the deviation of the distribution from the normal one [3].

To determine statistical relationships, correlation analysis has been carried out as a method of processing statistical data. The correlation coefficients between the density of the preserved undergrowth and young stands and the volume of tree crowns, as well as the age of the clear-cut area, have been studied. The coefficient of determination for the equation describing these relationships has been found in order to determine the magnitude of the change in the resultant feature under the influence of a factorial one (the closer its value is to one, the stronger the dependence).

Results and Discussion

Grouped data on the age, height, diameter, and density of spruce, pine, birch, and aspen undergrowth are presented in Table 1.

Table 1

The grouped data on the spruce, pine, birch and aspen undergrowth

Species	Age, years	Height, m	Diameter, cm	Placement density
Spruce	5	0.8	0.5	0.6
	6	1.0	0.8	0.6
	7	1.4	0.9	0.7
	8	1.8	1.0	0.8
	9	2.2	2.0	0.8
	10	2.7	2.5	0.7

The end of Table 1

Species	Age, years	Height, m	Diameter, cm	Placement density
Spruce	15	3.3	3.0	0.7
	18	4.0	4.0	0.7
Pine	5	1.0	1.0	0.5
	6	1.3	2.0	0.5
	7	1.8	2.0	0.6
	8	2.3	2.5	0.7
	9	2.7	2.5	0.7
	10	3.0	3.0	0.8
	15	5.0	4.0	0.8
	18	6.0	5.0	0.8
Birch	5	1.3	1.0	0.6
	6	1.5	1.0	0.6
	7	2.0	2.0	0.7
	8	2.6	2.0	0.8
	9	3.2	3.0	0.8
	10	3.7	4.0	0.7
	15	6.0	6.0	0.7
	18	8.0	7.0	0.7
Aspen	5	2.0	1.0	0.6
	6	2.3	1.5	0.7
	7	2.6	2.0	0.7
	8	3.0	2.0	0.8
	9	3.5	2.5	0.8
	10	4.0	2.5	0.8
	15	6.5	4.0	0.7
	18	9.0	5.0	0.7

The growth and productivity of plantations depend on the forest vegetation characteristics of the site where they grow [8, 9, 18]. Of all the inventory indicators characterizing the productivity of the plantation and at the same time reflecting its relationship with the quality of growing conditions, the height at a certain age is the most important. The greater it is, the better the growing conditions and the higher the productivity of the plantation.

During the study, it has been established that at the undergrowth stage, the parameters characterizing the productivity of the stand at the same age have significant differences in growth rates (from 0.6 to 49.0 cm in height and from 0.5 to 1.7 cm in diameter) and correspond to intermediate values between the 2nd (high) and 3rd (medium) quality classes.

The study found that natural young stands are formed from undergrowth of different age, which contributes to the preservation of the forest environment within the swaths. At the same time, undergrowth species are also developing with bird cherry (*Prunus padus* L.), black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), rowan (*Sorbus aucuparia* L.) and goat willow (*Salix caprea* L.) predominating. Shrubs are actively

growing such as red raspberry (*Rubus idaeus* L.), fly honeysuckle (*Lonicera xylosteum* L.), black currant (*Ribes nigrum* L.) and alder buckthorn (*Frangula alnus* Mill.). In the swaths, the living ground cover is represented by forest species of herbaceous vegetation (up to 90 % of the projective covering). And only on the trails do meadow species of herbaceous vegetation predominantly grow (70–100 %). It should be noted that the condition of the trails varies not only in terms of the projective covering of herbaceous vegetation, but also in the presence of tree and shrub species.

It should also be noted that in the first year after clear-cutting, the undergrowth and young stands of coniferous trees preserved in the swaths are exposed to the effects of increased solar radiation due to the removal of the stand in one go, causing a sharp change in environmental conditions. The study found that the undergrowth and young stands left in the swaths, seemingly unviable at first glance, adapt within 2 years after clear-cutting. Subsequently, a forest area is formed from undergrowth of different ages, passing into the stage of natural young growth at the age of 5 to 40 years. Its density increases due to the growth of new individuals. Fig. 1 shows the relationship between the density of undergrowth and young stands of coniferous tree species and the age of the cutting.

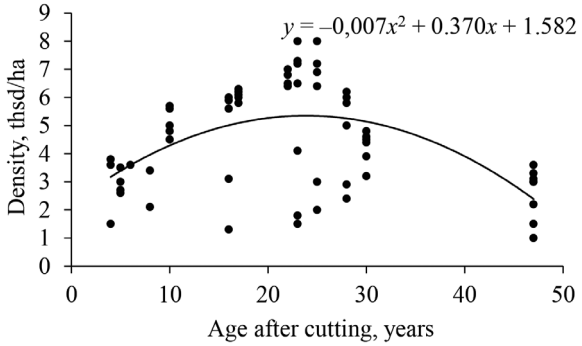


Fig. 1. The ratio of the density of undergrowth and young stands of coniferous forest-forming species of natural origin from the age of the cutting

Fig. 1 shows that the density of undergrowth of coniferous tree species increases every year to the age of 23–25 years, gradually passing into the stage of young growth. A negative kurtosis index indicates the heterogeneity of the plantation and the absence of competition until the specified age. Then the density of the young stands decreases and during the formation of an adult plantation, depending on the forest vegetation characteristics of each plot and tree species, it stabilizes.

The results of inventory and measurements of undergrowth and young stands of forest-forming species have shown that the density of softwood species exceeds the density of coniferous by 1.6–2.5 times. The largest number of specimens per 1 ha has been noted at a height of up to 1.5 m. Later, as a result of natural thinning, the density of birch and aspen forests decreases.

The relationship between the density of undergrowth and young stands and the age of the cutting can be described by a square polynomial. The coefficient of determination ($R^2 = 0.85$) indicates that with a change in the age of the cutting, in 85 % of cases there will be a corresponding change in the density of undergrowth and young stands of forest-forming species.

During the examination of forest areas, it has been established that large young trees (age class 2) and groups of middle-aged trees (age classes 3–4), as well as

seed trees, are preserved during the clear-cutting, the adaptation of the preserved undergrowth is accelerated and the effectiveness of measures to promote natural reforestation increases (Fig. 2).

Fig. 2. The condition of undergrowth and young stands in the swaths after clear-cutting with partially preserved young trees of age classes 1 and 2

The figure shows a viable young plantation that has recovered within 1–2 years after clear-cutting. It has been established that natural young stands in the swaths have a crown density from 0.4 to 0.7 already in the first year after clear-cutting. In the future, its value increases. The forest herbaceous vegetation is preserved, contributing to a faster restoration of the original forest type than in the areas with artificially created forest plantations. The overgrowth with herbaceous vegetation in the first years after its creation, caused by a sharp change in the ecological situation, contributes to their strong suppression and often death.

It has been noted that in the forest plantation areas the projective covering of the rush is 85–100 %. This indicates a high level of soil moisture. A characteristic feature of the study area is a hill-and-plain relief. After cutting, a type of clear-cut area is formed with a characteristic excessive moisture, a feature of which is currently water stagnation. With excessive moisture, the process of waterlogging develops. According to a preliminary assessment, which requires further research, this is due to a decrease in the rate of water exchange in river systems, a decrease in solid runoff, and a change in climatic conditions as a result of the creation of a number of reservoirs on the rivers of the European part of the Russian Plain. In addition, many rivers are characterized by snow feeding with a significant proportion of rain and groundwater [22].

The analysis of the taxation characteristics of the studied forest areas and experimental data have shown that mesohygrophilic and hygrophilic soils (B_3, C_3, B_4, C_4) predominate over more than 60 % of the territory of the study area [14]. In many cases, spruce plantations created by planting in the bottom of a furrow are completely destroyed (get soaked) or remain in a volume barely exceeding the threshold value. Their subsequent addition does not produce the desired effect. The most effective way of to create, as shown by many years of practice, is planting into a dump (on micro-elevations of the created furrows). The loss of seedlings has been noted within the normal range, the number of viable seedlings is 2.0 thousand pieces per 1 ha or more. However, in the course of the study, the facts have been established of the exposure of the root system of spruce plantations by the age of 22 years as a result of soil leaching from the micro-elevations (Fig. 3). This has a negative effect on the condition of the plantations. Cracks form, rot develops, and wood marketability is significantly reduced.

Fig. 3. The 22-year-old spruce plantations (planted in a furrow dump)

During the current stage of the study, an assessment of the state of forest plantations has been carried out. Table 2 presents the grouped data on measurements by age, height, diameter, and density of the spruce and pine plantations.

Table 2

The grouped data on growth rates of the spruce and pine plantations

Species	Age, years	Height, m	Diameter, cm	Placement density
Spruce	5	0.7	0.5	0.6
	6	0.9	0.8	0.6
	7	1.1	0.9	0.7
	8	1.5	1.0	0.8
	9	1.8	2.0	0.8
	10	2.7	2.0	0.7
	15	3.1	2.5	0.7
	18	3.7	3.0	0.7
Pine	5	0.8	1.0	0.4
	6	1.1	1.5	0.4
	7	1.5	1.5	0.5
	8	1.8	2.0	0.5
	9	2.1	2.0	0.6
	10	2.5	2.0	0.6
	15	4.0	3.0	0.7
	18	5.0	4.0	0.7

The analysis of the presented data has shown that the pine and spruce plantations have a lower height than the undergrowth of these species. Based on a full-scale survey of the cuttings, it has been revealed that the forest plantations created in the study area are represented by the spruce species in almost 100 % of cases. At the same time, the pine plantations take root and develop more efficiently than the spruce ones, but are subject to mass destruction by wild ungulates [1, 12].

Based on the measurements of the plantations and the young stands of natural origin formed at the same time, a graph of the ratio of the height with the age of the cutting has been plotted (Fig. 4).

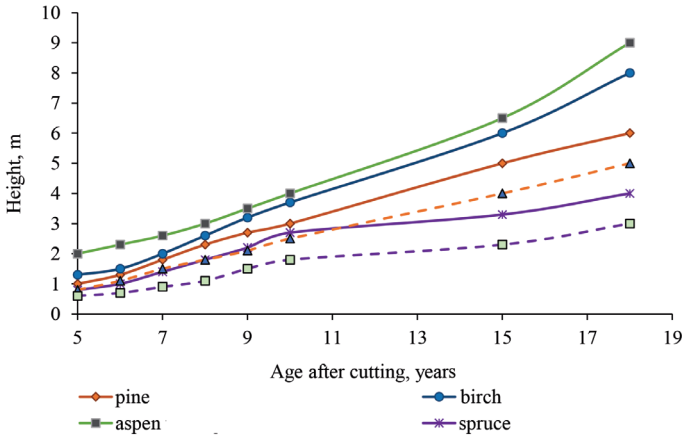


Fig. 4. The ratio of the height of pine and spruce plantations, as well as the simultaneously formed pine, spruce, birch and aspen undergrowth with the age of the cutting

The undergrowth adapts easier and faster mainly to the growing conditions B_4, B_3, C_3, C_4, A_4, A_3, and occasionally B_2. As can be seen in Fig. 4, the height of deciduous stand-forming species exceeds the height of natural coniferous young stands by 1.2–1.9 times, and that of coniferous species plantations – by 1.5–2.8 times. This indicates that the undergrowth of coniferous species is negatively affected by the deciduous to a lesser extent than the forest plantations. The formation of a mixed stand with equal participation of both deciduous and coniferous species is observed.

During the field study, it has been established that the density of aspen placement is higher than that of the young birch trees and spruce and pine plantations (Fig. 5).

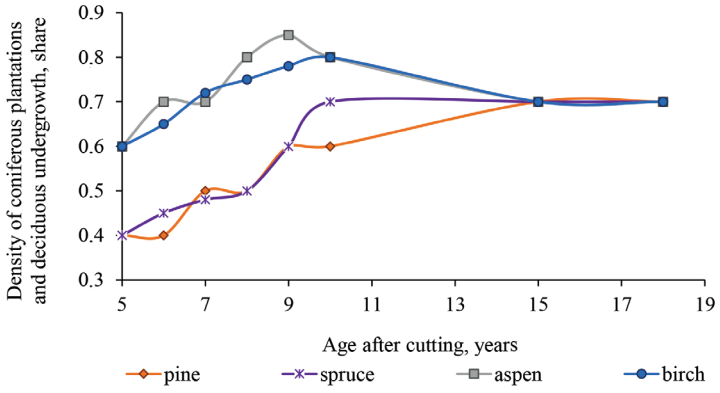


Fig. 5. The ratio of the placement density of spruce and pine plantations, as well as the formed birch and aspen undergrowth with the age of the cutting

The advantage of aspen in terms of placement density and height relative to the artificially created plantations contributes to the suppression of the latter.

As a result, the areas of forest plantations require agrotechnical tending and timely liberation cutting.

However, with an increase in the age of viable undergrowth, the density of their placement begins to equalize.

In the young stands of natural origin, it has been established that aspen has no significant advantage and does not suppress other forest-forming species (Fig. 6).

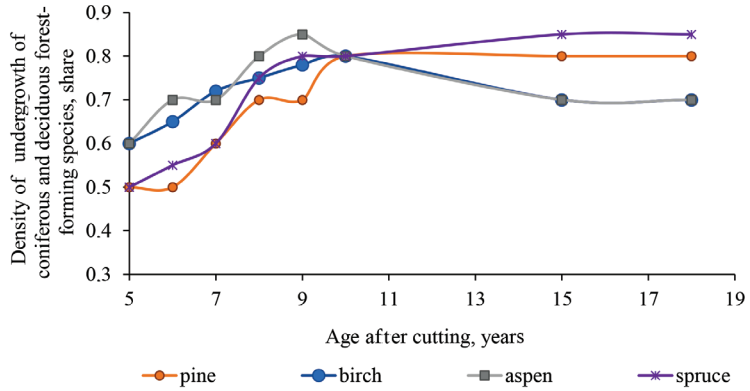


Fig. 6. The ratio of the placement density of spruce, pine, birch and aspen undergrowth with their age

Fig. 6 shows that the density of undergrowth of all tree species is close in value. By the age of 10–12 years after cutting, it reaches its maximum level, and then decreases and stabilizes at the level of 0.7. At the same time, the placement density of coniferous undergrowth increases.

The study took into account the accompanying undergrowth species. They perform an important silvicultural role and contribute to increasing the stability of the younger generation of forest-forming species: they provide the necessary shading from the intense influx of solar radiation (the optimal placement density or crown density of 0.5–0.6) and prevent soil sodding by shading light-requiring meadow herbaceous species. Their number per 1 ha during the years of adaptation of natural young stands after clear-cutting does not exceed 1,000 pcs/ha.

It has been noted that the density of forest plantations increases due to the natural renewal of forest-forming species in the rows and inter-row spaces.

The study has established a positive effect of raspberries on the degree of preservation of the forest environment on the skidding trails (Fig. 7): the multi-tier nature of the living ground cover is preserved – green mosses (*Orthotrichum*s sp., *Leucodon sciuroides*, *Pylaisiella polyantha*, *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruchetal) grow at the lower tier with a 60 % projective covering, false lily (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt) and wood-sorrel (*Oxalis acetosella* L.) with an even projective covering of up to 35 %; above them there is a tier of wood horsetail *Equisetum sylvaticum* L. (15 %), addersmeat *Stellaria holostea* L. (10 %), male fern *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott (10 %), fireweed *Epilobium angustifolium* L. (10–15 %), European blueberry *Vaccinium myrtillus* L. (distributed unevenly by groups, with 40 % covering).

a *b*

Fig. 7. Skidding trail: *a* – overgrown with raspberry; *b* – formed living ground cover of forest herbaceous plants formed on the skidding trail under the raspberry canopy

Raspberries provide shading of the soil surface, inhibiting the development of meadow herbaceous plants, and also prevents the burning out of forest species of herbaceous vegetation, preventing the soil from sodding. This helps to accelerate the formation of favourable conditions for the growth of self-seedlings in the areas without undergrowth.

The amount of self-seeded plants in such plots is 1,000–1,500 pcs/ha. Self-seeding is represented by 30 % spruce, 20 % pine, 25 % birch and 25 % aspen. Its species composition and percentage ratio of the included species depend on the growing plantation directly adjacent to the cutting.

Conclusion

In the coniferous-broad-leaved forest areas of the European part of Russia, young stands of natural origin are formed in the cuttings with the preserved mixed undergrowth, forming independent allotments with a completeness of 0.4–0.7. Large undergrowth adapted in the first 2 years after clear-cutting in the swaths, shading the lower tiers, prevents the regeneration of aspen and birch.

In the forest-growing conditions corresponding to A_4, B_4, C_4 and, if necessary, in the conditions A_3, B_3, C_3, reforestation should be carried out by preserving the undergrowth, leaving it in the swaths.

Taking into account the growth rates of pine and birch, in order to increase the effectiveness of reforestation measures it is advisable:

to increase the percentage of pine participation in the creation of forest plantations and implement their fencing;

in cuttings with a predominance of birch undergrowth, measures should be taken to promote the natural forest regeneration with subsequent care of the plantation in order to form merchantable birch wood.

Taking into account the demand for birch wood in the current economic conditions, it can be argued that it is the main (target) tree species and to assess the effectiveness of promoting natural reforestation, it must be taken into account together with coniferous and hardwood forest-forming species.

On the basis of experimental data on the height of undergrowth of soft-wooded undergrowth, it is advisable to distinguish three categories of its size: small –

up to 1.5 m, medium – from 1.6 m to 3.0 m and large – over 3.1 m (up to a height not exceeding 1/4 of the height of the trees in the main canopy). According to the density, the undergrowth of soft-wooded species can be divided into four density categories: sparse – up to 5,000, medium density – from 5,000 to 15,000, dense – from 15,000 to 20,000 and very dense – more than 20,000 plants per 1 ha.

REFERENCES

1. Angelstam P., Pedersen S., Manton M. Macroecological Research in Boreal Forest Reveals the Effects of Moose on Economically and Ecologically Important Tree Species. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 4, pp. 9–18. https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.9

2. Anuchin N.P. *Problems of Forest Management*. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 264 p. (In Russ.).

3. Belyaeva N.V., Grigorieva O.I. *Forestry and the Basics of Forest Plantations*. St. Petersburg, Saint Petersburg Forest Technical Academy Publ., 2011. 104 p. (In Russ.).

4. Fedoruk A.T. *Botanical Geography. Field Practice*: Monograph. Minsk, BSU Publ., 1976. 224 p. (In Russ.).

5. Gavrilova O.I., Gavrilov V.N. Formation of Pine and Birch Young Forests on Drained Transitional Mires of South Karelia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 6, pp. 36–45. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.36

6. Ilchukov S.V. Horizontal Structure of Spruce Undergrowth in Mature Middle-Taiga Spruce Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2008, no. 1, pp. 65–69. (In Russ.).

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

8. Khlyustov V.K. Unity of Forest Growth Conditions, Types of Forest Stands and Productivity of Forest Stands. *Prirodoobustrojstvo*, 2010, no. 1. (In Russ.). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/edinstvo-lesorastitelnyh-usloviy-tipov-lesnyh-nasazhdeniy-i-produktivnosti-drevostoev (accessed 05.12.18).

9. Martynov A.N. Frequency of Spruce Undergrowth as Factor of the Future Stand Productivity. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2001, no. 4, pp. 13–18. (In Russ.).

10. *Methods for Assessing the Reliability of Statistical Research Results*: Study Guide for Students. Kazan, 2011. (In Russ.). Available at: https://old.kazangmu.ru/files/Oz_Oz/_6__.pdf (accessed 01.12.18).

11. Obydennikov V.I., Kozhukhov N.I. *Types of Logging Sites and Reforestation.* Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ. 1977. 176 p. (In Russ.).

12. Pilipko E.N. The Trophic Effect of Moose (*Alces alces* L.) in the Mixed and Deciduous Stands of the Vologda Region in Summer. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 2, pp. 52–66. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.52

13. Pobedinskij A.V. *Study of Reforestation Processes*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 64 p. (In Russ.).

14. Rubtsov M.V., Glazunov Yu.B., Nikolaev D.K. Regenerative Dynamics of Spruce and Pine Plantations in Conditions Typical for Spruce Forests. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2016, no. 4, pp. 243–253. (In Russ.).

15. Runova E.M., Savchenkova V.A. *Improving the Technology of Logging Operations in the Conditions of the Middle Angara Region*: Monograph. Bratsk, Bratsk State University Publ., 2007. 116 p. (In Russ.).

16. Rusalenko A.I. Reforestation in Sticky Alder Forests of Belarus. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2014, no. 1, pp. 167–170. (In Russ.).

17. Rusalenko A.I. Technology and Costs for the Creation of Pine Forest Plantations Depending on the Growing Conditions. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2013, no. 1, pp. 182–185. (In Russ.).

18. Rybakova N.A., Rubtsov M.V. Effect of Birch Stand Cutting on Seed Production Spruce of Preliminary Generation in the South Taiga. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 2, pp. 21–31. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.21

19. Savchenkova V.A. *Features of Natural Regeneration of the Main Forest-Forming Species in the Conditions of the Angara Region*: Monograph. Moscow, Academy of Natural History Publ., 2011. 192 p. (In Russ.).

20. Savchenkova V.A., Nikitin V.F. The Evaluation of Productivity of Young Spruce of European Fir Tree (*Picea abies* L.). *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2018, no. 2, pp. 202–207. (In Russ.).

21. Sidorenkov V.M., Debkov N.M., Zhafyarov A.V., Nadilshina I.Yu. The Potential for Natural Forest Regeneration in the Southern Taiga Zone of Western Siberia. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2016, no. 7, pp. 47–56. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/19953

22. *The Rivers of the Russian Plain* (*Water Resources*). (In Russ.). Available at: http://biofile.ru/geo/1208.html (accessed 05.12.18).

23. Tishkov A.A. How to Conserve the Biodiversity and Which Forest Biodiversity Should Be Preserved in the European Part of Russia? A Speech of the Follower of the Actual Biogeography. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 5, pp. 379–387. (In Russ.).

24. Tsaregradskaya S.Yu. Dynamics of the Main Components of Forest Biogeocenoses. *Lesnoe khozyajstvo*, 1982, no. 2, pp. 59–61. (In Russ.).

25. Tsvetkov M.A. *Changes in Forest Cover in European Russia from the End of the 17th Century to 1914*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1957. 213 p. (In Russ.).

26. Tyrchenkova I.V. Evaluation of Natural Regeneration of Forests in Artificial Pine Plantations of the Voronezh Region. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2018, no. 2, pp. 104–114. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5b24060e5a1db0.90600278

27. Tyrchenkova I.V. Features of Reforestation on Clearings and Burnt-out Areas in Somovskoe Forestry of the Voronezh Region. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2017, no. 3, pp. 157–166. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_59c225837f7385.12703017

28. Zheldak V.I. *Ecological and Forestry Foundations of Targeted Sustainable Forest Management*. Pushkino, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization Publ., 2010. 377 p. (In Russ.).

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

---

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья
УДК 630*372/375
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-147-159

Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов

Е.Г. Хитров*[1], *д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID: R-8199-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4569-9508*
И.С. Должиков*[2]✉, *канд. техн. наук; *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2738-0483*
О.А. Куницкая*[3], *д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: AAC-9568-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8542-9380*
В.П. Друзьянова*[4], *д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: AAG-2463-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5409-3837*
Д.В. Болотин*[5], *аспирант; *ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4015-9661*
А.В. Андронов*[5], *канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: AAE-1491-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1035-9231*
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; hitrov_eg@spbstu.ru
[2]Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; idolzhikov222@mail.ru✉
[3]Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; ola.ola07@mail.ru
[4]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru
[5]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 191014; bolotin97@internet.ru, androvalexandr@gmail.com

Поступила в редакцию 26.01.24 / Одобрена после рецензирования 19.04.24 / Принята к печати 22.04.24

Аннотация. Для эксплуатационных и защитных лесных массивов Российской Федерации характерно очень большое разнообразие природно-производственных условий, включая рельефные и почвенно-грунтовые. Эффективность работы лесных машин в различных природно-производственных условиях во многом зависит от их проходимости, которая является одним из важнейших эксплуатационных показателей. Прогнозированию опорной проходимости лесных машин под воздействием условий эксплуатации посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными. Анализ работ предшественников позволяет утверждать, что известные прогнозные модели либо не учитывают такой важный показатель движителей лесных машин, как шаг грунтозацепов, либо не раскрывают его влияние на сцепление движителя с почвогрунтом. Настоящая работа посвящена теоретическому решению данного вопроса. Предложены уточ-

© Хитров Е.Г., Должиков И.С., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Болотин Д.В., Андронов А.В., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

нения к оценке коэффициента сцепления движителя лесной машины с почвогрунтом. Описан механизм затухания касательных напряжений, вызванных воздействием движителя лесной машины, причем затухание описывается нелинейными зависимостями. Рассмотрена оценка коэффициента сцепления, получаемая с учетом и без учета затухания сдвиговых деформаций вдоль пятна контакта. Расчеты показали, что оба этих варианта числовой оценки коэффициента сцепления согласуются и их относительные различия невелики. Важным нюансом является то, что по мере увеличения шага грунтозацепа оценки сцепления без учета затухания монотонно возрастают. Таким образом, для шага грунтозацепа последовала бы противоречивая рекомендация о его максимально возможном увеличении. Результаты, полученные с использованием предлагаемых формул, учитывающих затухание сдвиговых деформаций в почвогрунте, позволяют выделить диапазоны изменения шага, в которых отмечаются максимальные расчетные значения сцепления. Например, при коэффициенте буксования 0,05 максимум наблюдается при шаге в пределах 0,15–0,25 м. Таким образом, введение в математическую модель выражения, учитывающего затухание, дает возможность выявить качественно иной характер функции сцепления от шага и отметить оптимальную область его значений.
Ключевые слова: лесные машины, опорная проходимость, сдвиговые деформации, затухание деформаций, грунтозацепы, коэффициент сцепления движителя, буксование
Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета, за счет гранта РНФ № 23-16-00092, https://rscf.ru/project/23-16-00092/.

Для цитирования: Хитров Е.Г., Должиков И.С., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Болотин Д.В., Андронов А.В. Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 147–159. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-147-159

Original article

Modeling the Process of Adhesion of the Propeller to the Soil Taking into Account the Pitch of the Grousers

Egor G. Khitrov*[1]*, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: R-8199-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4569-9508*
Ilya S. Dolzhikov*[2]✉*, *Candidate of Engineering; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2738-0483*
Olga A. Kunitskaya*[3]*, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: AAC-9568-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8542-9380*
Varvara P. Druzyanova*[4]*, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: AAG-2463-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5409-3837*
Daniil V. Bolotin*[5]*, *Postgraduate Student; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4015-9661*
Aleksandr V. Andronov*[5]*, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAE-1491-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1035-9231*
[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ul. Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; hitrov_eg@spbstu.ru
[2]Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; idolzhikov222@mail.ru✉

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

[3]Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; ola.ola07@mail.ru
[4]M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; druzvar@mail.ru
[5]Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 191014, Russian Federation; bolotin97@internet.ru, andronovalexandr@gmail.com

Received on January 26, 2024 / Approved after reviewing on April 19, 2024 / Accepted on April 22, 2024

Abstract. The operational and protective forests of the Russian Federation are characterized by a very wide variety of natural and industrial conditions, including relief and soil ones. The efficiency of forestry machines in various natural and industrial conditions largely depends on their cross-country ability, which is one of the most important performance indicators. A significant amount of theoretical and experimental research by Russian and foreign scientists has been devoted to forecasting the flotation of forestry machines under various operating conditions. An analysis of the work of the predecessors suggests that the known forecast models either do not take into account such an important indicator of forestry machine propellers as the pitch of the grousers, or do not reveal its influence on the propeller adherence to the soil. This work is devoted to the theoretical solution of this issue. Clarifications have been proposed to the estimation of the coefficient of adhesion of the forestry machine propeller to the soil. The mechanism of attenuation of tangential stresses caused by the action of the forestry machine propeller has been described, where attenuation has been described by nonlinear dependencies. An estimate of the coefficient of adhesion obtained with and without taking into account the attenuation of shear deformations along the contact patch has been considered. Calculations have shown that both of these options for numerical estimation of the coefficient of adhesion are consistent and their relative differences are small. An important detail is that as the pitch of the grousers increases, the adhesion estimates without taking into account damping increase monotonically. Thus, for the pitch of the grousers there would be a contradictory recommendation about its maximum possible increase. The results obtained using the proposed formulas, taking into account the attenuation of shear deformations in the soil, make it possible to identify the ranges of pitch variation in which the maximum calculated values of adhesion are noted. For example, with a slip coefficient of 0.05, the maximum is observed at a pitch within 0.15–0.25 m. Thus, the introduction of an expression into the mathematical model that takes into account attenuation makes it possible to reveal a qualitatively different nature of the adhesion function from the pitch of the grousers and mark the optimal range of its values.

Keywords: forestry machines, flotation, shear deformations, attenuation of deformations, grousers, coefficient of adhesion of the propeller, slip
Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative Developments in the Field of Logging Industry and Forestry" of the Arctic State Agrotechnological University, at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, https://rscf.ru/project/23-16-00092/.

For citation: Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Druzyanova V.P., Bolotin D.V., Andronov A.V. Modeling the Process of Adhesion of the Propeller to the Soil Taking into Account the Pitch of the Grousers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 147–159. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-147-159

Введение

Опорная проходимость является важнейшим критерием эффективности работы машины. Для лесных машин, в подавляющем большинстве случаев функционирующих в сложных условиях эксплуатации, проходимость напрямую влияет на производительность, расход топлива и возможность выполнения поставленной технологической задачи [6–9, 12].

Проходимость лесных машин также напрямую связана с их экологической эффективностью – степенью повреждения движителями лесных почвогрунтов и состоянием лесной экосистемы после воздействия лесных машин, включая способность к естественному лесовосстановлению [2, 10, 11, 13].

Исходя из того, что почво-грунтовые и рельефные условия могут существенно различаться даже в пределах одной лесосеки, с точки зрения оценки возможной проходимости лесных машин на практике осуществляют предварительное трассирование сети трелевочных волоков и технологических коридоров, как при сплошных рубках спелых и перестойных насаждений, так и при выборочных рубках, включая рубки ухода [4, 14, 15, 24].

Оценка опорной проходимости выполняется по коэффициенту тяги, представляющему собой разность коэффициентов сцепления и сопротивления движению. Положительное значение коэффициента тяги означает, что проходимость машины обеспечена. Известны различные модели, полученные как теоретически, так и экспериментально, описывающие свойства почвогрунта и позволяющие прогнозировать сцепление движителя машины с почвогрунтом [3, 16, 18, 19, 23, 25, 26]. При этом почти не представлены модели, дающие возможность проанализировать влияние такого параметра движителя, как шаг грунтозацепов, на сцепление.

Целью данной работы является уточнение теоретического описания сцепных свойств движителей лесных машин и изучение влияния шага грунтозацепов на коэффициент сцепления движителя с почвогрунтом.

Объектом данного теоретического исследования является модель взаимодействия движителей грунтозацепов с различным шагом с лесным почвогрунтом. Применялись численные методы решения уравнений и аппроксимации данных.

Результаты исследования и их обсуждение

С практической точки зрения хорошо зарекомендовали себя математические модели, прогнозирующие коэффициент сцепления движителя с почвогрунтом, полученные интегрированием выражения для касательного напряжения, вызванного сдвигом почвогрунта при поступательном движении машины [17, 21, 22].

Модели строятся следующим образом. По сцепным свойствам почвогрунта и среднему давлению движителя по пятну контакта определяют сопротивление сдвигу без учета ослабления почвогрунта, вызванного срезом [20, 25]:

$$\tau_0 = p\mathrm{tg}\varphi + C,$$

где p – среднее давление движителя по пятну контакта; φ – угол внутреннего трения грунта; C – удельное сцепление частиц грунта.

С учетом полученного значения τ_0 определяют деформацию сдвига, соответствующую началу среза почвогрунта [1]:

$$j_0 = \frac{\tau_0 t_{гр}}{E_1}\sqrt{\frac{E_1}{C} - 1},$$

где $t_{гр}$ – шаг грунтозацепов; E_1 – модуль сдвига почвогрунта.

В зависимости от соотношения сдвиговой деформации j и j_0 рассчитывается коэффициент ослабления сцепных свойств почвогрунта [3, 19]:

$$\xi = 1 - \frac{j - j_0}{t_{гр}}\,\text{Heaviside}\left(j - j_0\right),$$

где Heaviside – единичная функция Хевисайда, доопределенная в нуле,

$$\text{Heaviside}\left(к\right) = \begin{cases} 1, к \geq 0 \\ 0, к < 0 \end{cases},$$

к – аргумент единичной функции.

В итоге с учетом ослабления грунта при развивающемся срезе определяется сопротивление почвогрунта сдвигу [1]:

$$\tau_1 = p\text{tg}\varphi + \xi C\text{Heaviside}\xi.$$

Распределение касательного напряжения вдоль пятна контакта задается формулой [1, 5]

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_1} + \frac{t_{гр}}{E_1 j}}.$$

Коэффициент сцепления по определению представляет собой отношение сопротивления почвогрунта сдвигу и нагрузки, приведенной к единичному движителю. При этом сопротивление находится интегрированием функции касательного напряжения вдоль пятна контакта [1, 4]:

$$\mu = \frac{F}{w} = \frac{1}{w} b\int_0^l \tau dx, \quad (1)$$

где F – сила сцепления; w – вес машины, приходящийся на единичный движитель; b – ширина пятна контакта; l – длина пятна контакта; x – горизонтальная координата.

В этом уравнении $\tau = \tau(x)$, причем для решения задачи необходимо принять функцию сдвиговой деформации вдоль пятна контакта. Считается, что деформация сдвига линейно зависит от координаты x и коэффициента буксования S [1, 16]:

$$j = Sx. \quad (2)$$

В данном случае интегрирование (1) при варьировании $t_{гр}$ приводит к получению зависимостей $\mu(t_{гр})$, монотонно возрастающих при увеличении $t_{гр}$. Таким образом, из результатов теоретического моделирования следует, что чем больше $t_{гр}$, тем выше оценка проходимости машины. В экспериментальных исследованиях изучить влияние $t_{гр}$ на μ сложно, поскольку, как правило, управлять его значением на практике не представляется возможным.

Предложим некоторые уточнения к теоретической оценке коэффициента сцепления μ.

Известно, что напряжения в массиве почвогрунта затухают, причем затухание описывается нелинейными зависимостями. Это обстоятельство учтено, например, при расчете глубины колеи, образующейся под воздействием движителя, введением поправочного коэффициента на затухание нормального напряжения по глубине массива почвогрунта [1, 20]:

$$J = \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{ab}\right)^2},$$

где z – вертикальная координата; a – коэффициент, учитывающий геометрические параметры пятна контакта и толщину деформируемого слоя почвогрунта [1],

$$a = 0,64\left(1 + \frac{b}{H}\right),$$

H – мощность деформируемого слоя почвогрунта.

В рассматриваемом случае воспользуемся следующими соображениями. Пусть деформация сдвига, вызванного воздействием i-го грунтозацепа, определяется по формуле

$$j_i = S\zeta_i\left(x - it_{\text{гр}}\right)\text{Heaviside}\left(x - it_{\text{гр}}\right),$$

где ζ_i – коэффициент затухания; i – индекс, соответствующий порядковому номеру грунтозацепа, участвующего в контакте движителя с почвогрунтом, и отсчитываемый вдоль пятна контакта, $i = 0 \ldots N - 1$ ($i = 0$ для 1-го грунтозацепа, $i = N - 1$ для последнего), N – число грунтозацепов, участвующих в контакте движителя с грунтом, целая часть отношения:

$$N = \left[\frac{t_{\text{гр}}}{l}\right].$$

Введем коэффициент затухания для касательного напряжения по аналогии со случаем, рассмотренным при изучении глубины образующейся колеи:

$$\zeta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - it_{\text{гр}}}{ab}\right)^2}.$$

Для i-го грунтозацепа запишем:

$$j_i = S\frac{x - it_{\text{гр}}}{1 + \left(\frac{x - it_{\text{гр}}}{ab}\right)^2}\text{Heaviside}\left(x - it_{\text{гр}}\right). \qquad (3)$$

Для гусеничного движителя можем принять $H >> b$, тогда:

$$\zeta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - it_{\text{гр}}}{0,64b}\right)^2};$$

$$j_i = S\frac{x - it_{\text{гр}}}{1 + \left(\frac{x - it_{\text{гр}}}{0,64b}\right)^2}\text{Heaviside}\left(x - it_{\text{гр}}\right). \quad (4)$$

В формулах (3), (4) единичная функция Хевисайда учитывает координату *i*-го грунтозацепа вдоль пятна контакта, т. е. координату, соответствующую началу воздействия *i*-го грунтозацепа на почвогрунт.

Функцию сдвиговой деформации найдем как сумму деформаций, вызванных каждым из грунтозацепов, с учетом затухания:

$$j = \sum_{i=0}^{N-1} j_i. \quad (5)$$

Проиллюстрируем формулы (4), (5) графиками. На рис. 1 показано изменение сдвиговой деформации, вызванной воздействием *i*-го грунтозацепа движителя, по координате *x* вдоль пятна контакта. Пример рассчитан при $t_{\text{гр}}$ = = 0,2032 м, *b* = 0,61 м, *l* = 3,81 м (такие параметры соответствуют гусеничному движителю машины John Deere 959M), *S* = 0,2. При тех же исходных данных сравним результаты расчета сдвиговой деформации по модели (4), (5) и по линейной модели (2) (рис. 2).

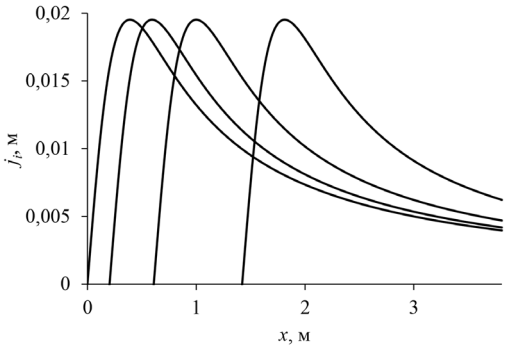


Рис. 1. Деформация сдвига, вызванная *i*-м грунтозацепом, вдоль пятна контакта, *i* = {0; 1; 3; 7}

Fig. 1. The shear deformation caused by the *i*-th grouser along the contact patch, *i* = {0; 1; 3; 7}

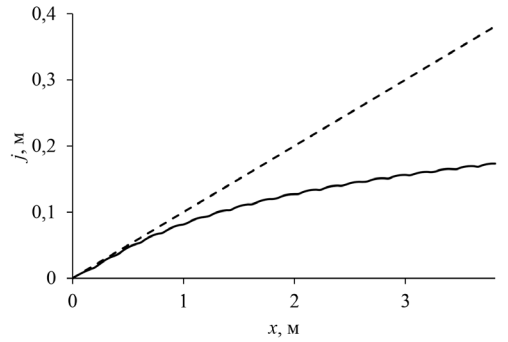


Рис. 2. Деформация сдвига, рассчитанная с учетом и без учета затухания вдоль пятна контакта (здесь и на рис. 3, 4: пунктирная линия – линейная функция (2); сплошная линия – функция с затуханием (4), (5))

Fig. 2. The shear deformation calculated with and without attenuation along the contact patch (here and in Fig. 3, 4: the dotted line is the linear function (2); the solid line is the function with attenuation (4), (5))

Рассмотрим влияние шага грунтозацепов $t_{\text{гр}}$ на сцепление движителя с почвогрунтом. Сравним оценки коэффициента сцепления μ, получаемые с учетом и без учета затухания сдвиговых деформаций *j* вдоль пятна контакта. Примем для иллюстрации среднее давление *p* = 0,0724 МПа, а также механические свойства грунта *G*, *C*, φ по таблице.

Сдвиговые свойства лесного почвогрунта по категориям прочности

The shear properties of forest soil by strength categories

Категория	*C*, МПа	φ, …°	*G*, МПа
I (прочный)	0,0252	16,7	2,77
II (средней прочности)	0,0108	13,7	2,44
III (слабонесущий)	0,0053	11,6	2,19

На рис. 3 приведены результаты расчета коэффициента сцепления μ при варьировании шага $t_{гр}$ и различном коэффициенте буксования *S*.

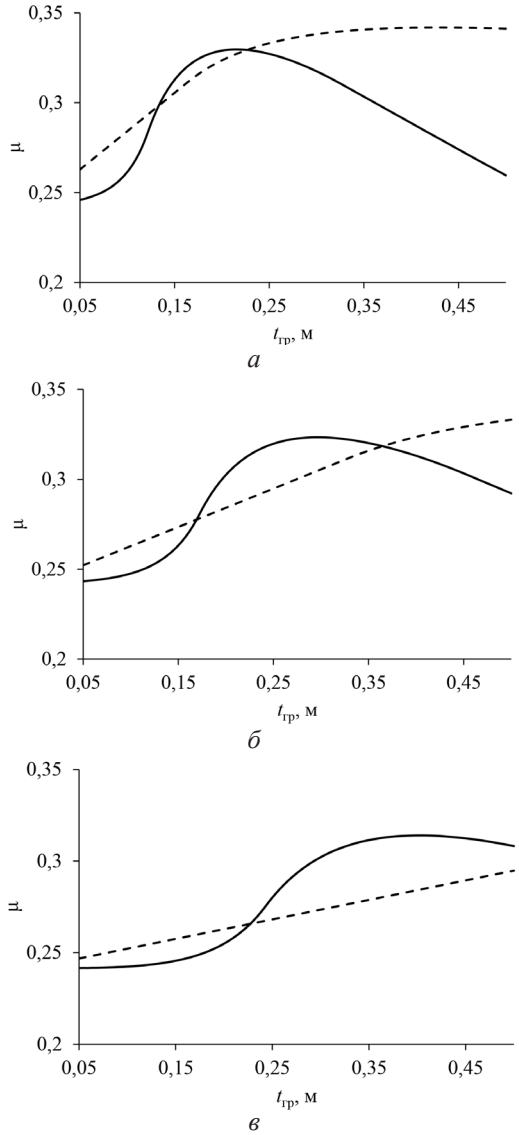


Рис. 3. Коэффициент сцепления в зависимости от шага грунтозацепов при коэффициенте буксования: *а* – 0,05; *б* – 0,10; *в* – 0,20

Fig. 3. The coefficient of adhesion, depending on the pitch of the grousers, at the slip coefficient equal to: *а* – 0.05; *б* – 0.10; *в* – 0.20

Расчеты показывают, что числовые оценки коэффициента сцепления μ с учетом и без учета затухания сдвиговой деформации в целом согласуются и их относительные различия невелики. Значения, полученные при различных предпосылках к определению сдвиговых деформаций, вполне сопоставимы. Важ-

ным различием является то, что по мере увеличения $t_{гр}$ оценки μ, полученные без учета затухания – с использованием формулы (2), монотонно возрастают. Таким образом, для параметра $t_{гр}$ последовала бы рекомендация о максимально возможном увеличении.

Результаты, полученные с использованием формул (4), (5), учитывающих затухание сдвиговых деформаций в почвогрунте, позволяют выделить диапазоны изменения $t_{гр}$, в которых отмечаются максимальные расчетные значения μ. Например, при коэффициенте буксования S = 0,05 максимум μ наблюдается при $t_{гр}$ в пределах 0,15–0,25 м (рис. 3, *а*). При S = 0,10 – находится в области $t_{гр}$ = 0,20–0,30 м (рис. 3, *б*). Отметим, что эти результаты согласуются с шагом $t_{гр}$ гусениц, которыми производители оснащают технику. При S = 0,20 максимуму μ соответствует шаг $t_{гр}$ в пределах 0,30–0,40 м (рис. 3, *в*), хотя с практической точки зрения столь большой коэффициент буксования для гусеничной машины едва ли возможен, поскольку при таком значении ожидаема потеря опорной проходимости. Таким образом, введение в математическую модель выражения, учитывающего затухание, позволяет выявить качественно иной характер функции $\mu(t_{гр})$ и отметить оптимальную область значений $t_{гр}$.

До сих пор коэффициент S принимался как входной параметр модели. Однако на практике он не является управляемым параметром. Рассмотрим физическую суть коэффициента. По определению,

$$v = (1 - S)\, v_0,$$

где v – фактическая скорость поступательного движения машины с учетом пробуксовки; v_0 – скорость машины, движущейся поступательно без буксования.

Таким образом, коэффициент буксования S представляет собой долю потери скорости машины.

С другой стороны, результаты расчетов показывают, что коэффициенты S и μ связаны. Рассчитаем μ при варьировании S с постоянным шагом $t_{гр}$ = 0,2032 м. Значения остальных параметров гусеничного движителя и грунта (лесной почвогрунт II категории прочности) прежние (рис. 4).

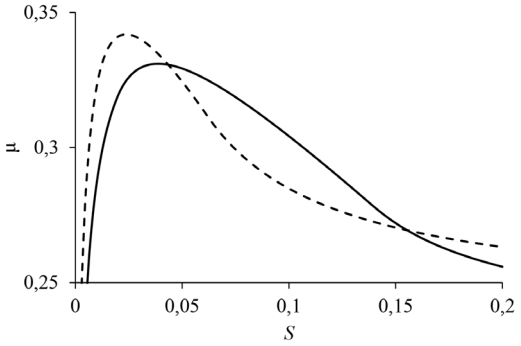


Рис. 4. Коэффициент сцепления при различном коэффициенте буксования

Fig. 4. The coefficient of adhesion at different slip coefficients

В рассчитанном примере при S = 0 обе оценки μ = 0 (на рис. 4 область S < 0,01 не показана). Максимальные μ отмечаются при S = 0,024 (μ = 0,342) в случае использования линейной модели сдвиговой деформации (2) и при S = 0,038 (μ = 0,331) в случае применения формул (4), (5).

Как было отмечено, критерием опорной проходимости является положительное значение коэффициента тяги φ_p:

$$\varphi_p = \mu - \varphi_r > 0,$$

где φ_r – коэффициент сопротивления поступательному движению машины.

Тогда в приведенном примере опорная проходимость гусеничной машины обеспечена вплоть до $\varphi_r < 0{,}331$. При большем сопротивлении движению произойдет срез почвогрунта, а глубина колеи увеличится за счет буксования машины на месте. При меньшем сопротивлении движению, например при $\varphi_r = 0{,}3$, проходимость обеспечивается при $\mu > 0{,}3$. Таким образом, коэффициент буксования составит $S \approx 0{,}014$. Коэффициент буксования S можно рассматривать как «меру ответной реакции» почвогрунта на касательное напряжение, вызванное движителем, преодолевающим сопротивление движению.

Заключение

Выполненные расчеты показали, что числовые оценки коэффициента сцепления, полученные с учетом и без учета затухания сдвиговой деформации, согласуются и их относительные различия невелики. Однако важно отметить, что по мере увеличения шага грунтозацепа оценки сцепления без учета затухания монотонно возрастают. Таким образом, для шага грунтозацепа последовала бы рекомендация о его максимально возможном увеличении, что сомнительно с точки зрения физики процесса.

Результаты, полученные с использованием предлагаемых формул, принимающих во внимание затухание сдвиговых деформаций в почвогрунте, позволяют выделить диапазоны изменения шага, в которых отмечаются максимальные расчетные значения сцепления. Например, при коэффициенте буксования 0,05 максимум наблюдается при шаге в пределах 0,15–0,25 м. Таким образом, введение в математическую модель выражения, учитывающего затухание, позволяет выявить качественно иной характер функции сцепления от шага и отметить оптимальную область его значений.

В результате исследования сцепления с учетом буксования движителя можно заключить, что для уточнения оценки опорной проходимости лесных машин потребуются дальнейшие разработки. Следует развить модели, учитывающие как сопротивление почвогрунта образованию колеи, так и составляющую сопротивления движению, связанную с липкостью грунта. Это особенно важно для гусеничных машин – площадь пятна контакта гусеницы с почвогрунтом заметно больше, чем колеса.

При наличии верифицированных моделей, прогнозирующих сопротивление движению, станет возможным проведение дальнейших вычислительных экспериментов в области оптимизации параметров движителей лесных машин с учетом такого фактора, как шаг грунтозацепов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Агейкин Я.С.* Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 231 с.

Agejkin Ya.S. *Vehicle Cross-Country Ability*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 231 p. (In Russ.).

2. *Базаров С.М., Григорьев И.В., Киселев Д.С., Никифорова А.И., Иванов А.В.* Влияние деформации движителей колесно-гусеничных машин на их проходимость по лесосеке // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4(16). С. 36–40.

Bazarov S.M., Grigor'yev I.V., Kiselyov D.S., Nikiforova A.I., Ivanov A.V. Effect of Deformation of Wheel Caterpillar Vehicles Propelling Devices on Their Passability through Logging Area. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2012, no. 4(16), pp. 36–40. (In Russ.).

3. *Герц Э.Ф., Куницкая О.А., Макуев В.А., Дмитриев А.С., Тихонов Е.А., Григорьева О.И.* Средощадящие технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области // Деревообраб. пром-сть. 2023. № 1. С. 52–63.

Hertz E.F., Kunitskaya O.A., Makuev V.A., Dmitriev A.S., Tikhonov E.A., Grigoreva O.I. Environmental Technologies for the Development of Cutting Areas in the Sverdlovsk Region. *Derevoobrabativaushaya Promishlennost'* = Woodworking Industry, 2023, no. 1, pp. 52–63. (In Russ.).

4. *Григорьев И.В.* Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 235 с.

Grigor'yev I.V. *Reducing the Negative Impact of Wheeled Skidding Tractors on the Soil by Substantiating Their Movement Modes and Technological Equipment.* St. Petersburg, St. Petersburg Forestry Engineering Academy, 2006. 235 p. (In Russ.).

5. *Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В.* Средощадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: ЛТА, 2008. 174 с.

Grigor'yev I.V., Zhukova A.I., Grigor'yeva O.I., Ivanov A.V. *Environmentally Friendly Technologies for Logging Development in the Conditions of the North-Western Region of the Russian Federation*. St. Petersburg, St. Petersburg Forestry Engineering Academy, 2008. 174 p. (In Russ.).

6. *Луценко Е.В., Рябухин П.Б.* К определению применимости систем лесосечных машин // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2006. № 16. С. 23–26.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B. To Determining the Applicability of Logging Machine Systems. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 16, pp. 23–26. (In Russ.).

7. *Луценко Е.В., Рябухин П.Б.* Динамика эффективности систем лесосечных машин в условиях Дальнего Востока // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2006. № 16. С. 26–28.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B. Dynamics of Efficiency of Logging Machine Systems in the Conditions of the Far East. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 16, pp. 26–28. (In Russ.).

8. *Луценко Е.В., Рябухин П.Б.* К определению путей перемещения трелевочных тракторов, работающих в комплексе с валочно-пакетирующей машиной // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2006. № 16. С. 28–31.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B. To Determining the Ways of Movement of Skidding Tractors Operating in Combination with a Feller-Buncher Machine. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 16, pp. 28–31. (In Russ.).

9. *Луценко Е.В., Рябухин П.Б., Абраменко А.С.* К решению вопроса повышения эффективности работы современных лесосечных машин // Вестн. ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 183–188.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B., Abramenko A.S. Towards Solving the Issue of Improving the Efficiency of Modern Logging Machines. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of the Pacific National University, 2008, no. 1(8), pp. 183–188. (In Russ.).

10. *Майорова Л.П., Рябухин П.Б.* Оценка ущерба от загрязнения атмосферного воздуха при лесозаготовках // Лесн. хоз-во. 2007. № 3. С. 33–34.

Majorova L.P., Ryabukhin P.B. Assessment of Damage from Atmospheric Air Pollution during Logging. *Lesnoe khozyajstvo*, 2007, no. 3, pp. 33–34. (In Russ.).

11. *Майорова Л.П., Рябухин П.Б., Мелешко М.А.* Оценка загрязнения атмосферного воздуха в процессе лесозаготовок // Вестн. КрасГАУ. 2007. № 4. С. 86–91.

Majorova L.P., Ryabukhin P.B., Meleshko M.A. Assessment of Atmospheric Air Pollution during Logging. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2007, no. 4, pp. 86–91. (In Russ.).

12. *Рябухин П.Б.* Обоснование выбора основных показателей качества функционирования систем лесозаготовительных машин в условиях Дальнего Востока // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2007. № 1. С. 129–131.

Ryabukhin P.B. Substantiation of the Choice of the Main Performance Indicators of Forestry Machine Systems in the Conditions of the Far East. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2007, no. 1, pp. 129–131. (In Russ.).

13. *Рябухин П.Б., Казаков Н.В.* Комплексная модель для решения задачи структурно-параметрического синтеза систем лесозаготовительных машин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2(2). С. 42–44.

Ryabukhin P.B., Kazakov N.V. Complex Model for Solving the Task of Structural-Parametric Synthesis of Logging Machinery. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2009, no. 2(2), pp. 42–44. (In Russ.).

14. *Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Бурлов А.Н.* Метод лесопромышленной типизации лесосек по природно-производственным условиям на примере ельников Дальневосточного федерального округа // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 2(6). С. 52–57.

Ryabukhin P.B., Kazakov N.V., Burlov A.N. Method of Timber Industry Typification of Cutting Areas According to Natural and Industrial Conditions (Spruce Forest of Far East Federal District as an Example. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2010, no. 2(6), pp. 52–57. (In Russ.).

15. *Рябухин П.Б., Ковалев А.П.* Лесохозяйственная оценка лесосечных машин по критерию сохранности подроста // Вестн. КрасГАУ. 2008. № 1. С. 216–222.

Ryabukhin P.B., Kovalev A.P. Forestry Assessment of Logging Machines According to the Criterion of Undergrowth Preservation. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2008, no. 1, pp. 216–222. (In Russ.).

16. *Шапиро В.Я.* Инвариантность принципов механики контактного разрушения при математическом моделировании процессов лесопромышленного комплекса // Наукосфера. 2022. № 2-1. С. 121–124.

Shapiro V.Ya. Invariance of Principles of Contact Fault Mechanics during Mathematical Modeling of Forestry Complex Processes. *Naukosfera*, 2022, no. 2-1, pp. 121–124. (In Russ.).

17. *Шапиро В.Я.* Влияние анизотропии свойств оттаивающего почвогрунта на устойчивость трелевочного волока на склоне // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 63. С. 339–342.

Shapiro V.Ya. The Influence of Anisotropy of Thawing Soil Properties on the Stability of a Skidding Track on the Slope. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2023, no. 63, pp. 339–342. (In Russ.).

18. *Шапиро В.Я.* Влияние анизотропии свойств массива грунта на особенности разрушения его краевой части от нагрузки трелевочной системы // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 64. С. 285–290.

Shapiro V.Ya. The Influence of Anisotropy of Soil Mass Properties on the Features of Destruction of its Marginal Part from the Load of the Skidding System. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2023, no. 64, pp. 285–290. (In Russ.).

19. Cuong D.M., Zhu S., Ngoc N.T. Study on the Variation Characteristics of Vertical Equivalent Damping Ratio of Tire–Soil System Using Semi-Empirical Model. *Journal of Terramechanics*, 2014, vol. 51, pp. 67–80. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.10.002

20. Ding L., Yang H., Gao H., Li N., Deng Z., Guo J., Li N. Terramechanics-Based Modeling of Sinkage and Moment for in-situ Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, vol. 116, pp. 14–33. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011

21. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Assessment the Effect of Skidding Techniques on the Ecological Efficiency of the Skidding Tractor. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 67–75. https://doi.org/10.29354/diag/125311

22. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Ivanov V., Shuvalova S., Shvetsova V., Stepanishcheva M., Tikhonov E. Theoretical Studies of Dynamic Soil Compaction by Wheeled Forestry Machines. *Diagnostyka*, 2020, vol. 2, no. 4, pp. 3–13. https://doi.org/10.29354/diag/127650

23. Khakhina A., Grigorev I., Dolmatov N., Makuev V., Kruchinin I., Storodubtseva T., Burgonutdinov A., Markov O. Predicting the Passability of Wheeled Tractors. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2022, vol. 9, no. 5, pp. 1233–1242. https://doi.org/10.18280/mmep.090510

24. Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for Calculating Schemes of Transport Routes in a Felling Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. no. 012025. https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012025

25. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Zh., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical Approaches to Logging Trail Network Planning: Increasing Efficiency of Forest Machines and Reducing Their Negative Impact on Soil and Terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 61–75. https://doi.org/10.3233/AJW190049

26. Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I., Burgonutdinov A., Kruchinin I., Prosuzhih A., Dolmatov N., Dmitrieva N. The Mathematical Model of Forestry Machines Impact on Cryolitozone Forest Soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 89–95. https://doi.org/10.3233/AJW200055

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Original article
УДК 630*23(470.45)
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-160-174

Assessment of the Boron Treatability Level of Lesser-Known Timber Species by the Impregnation Method

Vindhya Bandara*[1]*, BSc Holder; *ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0848-0510*
Anura Alwis*[1]*, Professor; *ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8888-4952*
Thusitha Bandara*[1]*, PhD Holder; *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0673-0808*
Chaminda Muthumala*[2]*, PhD Holder; *ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9358-7717*
Faiz Marikar*[3]✉*, Director; *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4579-7263*
[1]Department of Agricultural Engineering & Environmental Technology, Faculty of Agriculture, University of Ruhuna, Matara-Kamburupitiya Road, Mapalana, 81100, Sri Lanka; vasbanda@ageng.ruh.ac.lk, aalwis@ageng.ruh.ac.lk, bandara@ageng.ruh.ac.lk
[2]Research Development and Training Division, State Timber Corporation, Sampathpaya, Rajamalwatta Road, Battaramulla, 10120, Sri Lanka; ck_muthumala@yahoo.com
[3]General Sir John Kotelawala Defence University, Kandawala Road, Ratmalana, 10390, Sri Lanka; faiz@kdu.ac.lk✉

Received on March 28, 2024 / Approved after reviewing on June 19, 2024 / Accepted on June 23, 2024

Abstract. Faced with the escalating crisis of global deforestation, including particularly alarming rates in Sri Lanka, researchers have turned their attention to the potential of boron-based preservatives for treating timber. The comprehensive study of the samples has revealed a significant negative correlation between the treatability of timber under pressure and the total area of vessels and wood density. Woods with fewer and smaller vessels are more receptive to boron treatment, making them more suitable for preservation. The study also identified a positive, though somewhat weak, correlation between treatability and the total ray area within the wood, indicating that the internal structure of timber plays a crucial role in its preservation potential. The timber during the research has been categorized based on the depth of boron penetration, with categories ranging from fully penetrated to less than 5 mm. The findings obtained suggest that boron preservatives offer a promising and sustainable alternative to traditional timber treatment methods. By categorizing wood based on the treatability and anatomical properties, we can optimize the treatment processes, thereby maximizing resource utilization and minimizing waste. Thus boron-treated timber could become a cornerstone in the fight against deforestation in future, providing a responsible and environmentally friendly alternative to the untreated wood. In doing so, the research contributes significantly to the preservation of our forests and the overall well-being of our planet, offering a promising trajectory in sustainable forestry practices.

Keywords: anatomical features, boron, chemical retention, density, penetration, preservative, pressure impregnation, treatability
Acknowledgements: Authors would like to express their gratitude to Mr. T. Jayalath, Mr. Suraj Pathirana, Mr. Asanka, and Mr. Nishantha, Lab Assistants at Research Development and Training Unit, for making the necessary arrangements to carry out this study at the State Timber Corporation. Special thank goes to Mr. Amila of the State Timber Corporation, Boossa, who helped to prepare timber samples and process the boron treatment.

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

For citation: Bandara V., Alwis A., Bandara T., Muthumala C., Marikar F. Assessment of the Boron Treatability Level of Lesser-Known Timber Species by the Impregnation Method. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 160–174. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-160-174

Научная статья

Оценка степени обработки бором древесины методом пропитки

В. Бандара*[1]*, *соискатель; ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0848-0510*
А. Алвис*[1]*, *проф.; ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8888-4952*
Т. Бандара*[1]*, *д-р наук; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0673-0808*
Ч. Мутхумала*[2]*, *д-р наук; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9358-7717*
Ф. Марикар*[3]✉*, *директор; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4579-7263*
[1]Департамент сельскохозяйственной инженерии и природоохранных технологий, факультет сельского хозяйства, Университет Рухуны, Матара-Камбурупития-роуд, дер. Мапалана, окр. Матара, Шри-Ланка, 81100; vasbanda@ageng.ruh.ac.lk, aalwis@ageng.ruh.ac.lk, bandara@ageng.ruh.ac.lk
[2]Отдел исследований, развития и обучения, Государственная лесная корпорация, Сампатпайя, Раджамалуэтта-роуд, Баттарамулла, Шри-Ланка, 10120; ck_muthumala@yahoo.com
[3]Университет обороны им. генерала сэра Джона Котелавалы, Кандавала-роуд, Ратмалана, Шри-Ланка, 10390; faiz@kdu.ac.lk✉

Поступила в редакцию 28.03.24 / Одобрена после рецензирования 19.06.24 / Принята к печати 23.06.24

Аннотация. На сегодняшний день остро стоит проблема глобального обезлесения, его темпы особенно тревожны на Шри-Ланке. Этим обусловлены исследования потенциала консервантов на основе бора для обработки древесины. Всестороннее изучение образцов выявило значительную отрицательную корреляцию между пропитываемостью древесины под давлением и общей площадью сосудов, плотностью древесины. Древесина с меньшими количеством и объемом сосудов оказалась более восприимчивой к обработке бором – и в связи с этим более пригодной для консервации. Также выявлена хотя и достаточно слабая, но положительная корреляция между пропитываемостью и общей площадью лучей древесины, указывающая на решающую роль внутренней структуры древесины в сохранности древесины в целом. В ходе исследования древесина категоризирована в зависимости от глубины проникновения бора: от полной до менее 5 мм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что борсодержащие консерванты представляют собой перспективную и устойчивую альтернативу традиционным методам обработки древесины. Категоризация древесины по степени пропитываемости и анатомическим свойствам открывает возможность для оптимизации процессов обработки с максимальным использованием ресурсов и минимальным количеством отходов. Таким образом, в будущем древесина, обработанная бором, способна стать основой в борьбе с обезлесением, представляя собой надежную и экологически чистую альтернативу необработанной древесине. Тем самым исследование вносит значительный вклад в сохранение лесов и общее благополучие планеты, предлагая многообещающую траекторию развития устойчивого лесоводства.

© Бандара В., Алвис А., Бандара Т., Мутхумала Ч., Марикар Ф., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: анатомические особенности, бор, удержание химикатов, плотность, проникновение, консервант, пропитка под давлением, пропитываемость
Благодарности: Авторы выражают благодарность г-ну Т. Джаялату, г-ну Суражу Патхиране, г-ну Асанке и г-ну Нишанте – лаборантам отдела исследований, развития и обучения Государственной лесной корпорации – за помощь при проведении исследования. Особую благодарность приносят г-ну Амиле – сотруднику Государственной лесной корпорации в г. Босса – за помощь в подготовке образцов древесины и их обработке бором.

Для цитирования: Bandara V., Alwis A., Bandara T., Muthumala C., Marikar F. Assessment of the Boron Treatability Level of Lesser-Known Timber Species by the Impregnation Method // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 160–174. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-160-174

Introduction

Timber, meaning “building material” in old English, is a specific type of wood used in construction and engineering [5, 8]. It is highly valued for its low heat transfer, strength, and lightness, but its high demand has led to shortages. Traditionally, construction and wood products rely on natural timber, but this is becoming increasingly scarce [1, 20]. The timber industry needs to find new types of wood that do not come from natural forests, as natural forests are running out. This can compromise safety and cause financial losses. The natural durability, design, and protection measures applied to wood determine its lifespan [2, 10]. With proper care, wooden objects like historical structures, instruments, and artifacts can last for centuries.

Wooden elements like beams, cabinets, and flooring are widely used in construction but are susceptible to decay from various factors like water, heat, and microbes [6, 19]. Several factors can damage wood, including fungi, insects, bacteria, marine animals, weather, wear and tear, and chemicals [3, 17]. Some of the insects that harm wood include termites, carpenter bees, longhorn beetles, and ambrosia beetles. Timber preservation involves treating wood with chemicals or other agents to prevent or slow down its degradation by organisms or other factors [4, 14]. These preservatives should be toxic only to specific target organisms (fungi, insects, etc.), easily penetrate wood, remain stable over time, and not damage the wood itself. Additionally, they should be affordable, readily available, and not increase wood flammability. Depending on the intended use of the treated wood, additional properties like odorlessness, colorlessness, and non-corrosiveness may be desirable. Three main types of preservatives exist: oily, organic solvent-based, and water-soluble [11, 15]. Preservatives can be applied using non-pressure methods like brushing or dipping, or through pressure processes.

There are two main ways to protect wood: treating it with chemicals (preservation) or modifying its structure (modification). Preservatives have a long history of success, extending the life of wood products and reducing costs by minimizing repairs and replacements [7, 9]. They help protect wood from insects, fungi, marine creatures, bacteria, fire, weathering, and harmful chemicals. Boron protects wood from fungi, insects (like termites) and fire, making it a safe and effective preservative for interior wooden products. Applied through pressure impregnation using a 6 % boric acid equivalent solution, boron treatment offers reliable protection [16, 18].

Despite its sustainability credentials, timber faces challenges due to limited resources of high-grade species and rising costs. Lesser-known timber presents a potential alternative, however, difficulties in identification, lack of data on properties, and poor grading hinder its wider adoption. Furthermore, these species are susceptible to insect damage, necessitating the use of preservatives for their protection. In essence, the utilization of lesser-known timber requires addressing identification issues, enhancing property data, improving grading practices, and implementing effective preservation strategies. This research successfully demonstrates the viability of using boron treatment through the impregnation as a means to replace lesser-known timber species, presenting a solution to the challenges associated with their treatment.

Research Objects and Methods

The study was conducted at the State Timber Corporation of Battaramulla and the Timber Complex at Bossa since February 2023 until July 2023. In this investigation, 20 lesser-known timber species (Table 1) have been selected that can be used for construction and other purposes.

Table 1

Lesser-known timber species selected for the experiment

Common name	Botanical name	Family
Acacia	*Acacia mangium*	Fabaceae
Aladu	*Allaeanthus zeylanicus*	Moraceae
Arawkeriya	*Araucaria columnaris*	Araucariacea
Attikka	*Ficus racemosa*	Moraceae
Bora-Daminiya	*Grewia helicterifolia*	Malvaceae
Dunu-Madala	*Stereospermum personatum*	Bignoniaceae
Helamba	*Mitragyna parvifolia*	Rubiaceae
Katu-Boda	*Cullenia ceylanica*	Malvaceae
Kaha-Milla	*Vitex altissima*	Lamiaceae
Karaw	*Margaritaria indica*	Phyllanthaceae
Katu-Andara	*Dichrostachys cinerea*	Fabaceae
Kora-Kaha	*Memecylon umbellatum*	Melastomataceae
Kurumbettiya	*Syzygium rubicundum*	Myrtaceae
Maha-Kadol	*Rhizophora mucronata*	Rhizophoraceae
Maha-Nuga	*Ficus benghalensis*	Moraceae
Na-Imbul	*Harpullia arborea*	Sapindaceae
Path-Kela	*Bridelia moonii*	Phyllanthaceae
Pelan	*Bhesa ceylanica*	Centroplacaceae
Ruk-Aththana	*Alstonia scholaris*	Apocynaceae
Wana-Sapu	*Cananga odorata*	Annonaceae

Identification of the Wood Anatomy Using a Hand-Held Digital Microscope with a Computer. Two sample blocks of the selected lesser-known timber species of 2×2×3 cm have been prepared and labelled. Authentication has been ensured in the first stage by comparing the authentic timber samples. Cross-sectional timber samples

have been identified using a hand-held digital microscope. Anatomical observations have been made at 20 magnifications within 25 mm^2 areas using the photographs taken with Micrometrics SE Premium 4 software. Paper cut into 25 mm^2 squares has been used to determine 25 mm^2 areas. The identity of the wood has been confirmed with the authentic timber sample data available from the State Timber Corporation, Battaramulla.

Identification of the Wood Anatomy Using the Accu-Scope 3000 Series Trinocular Microscope with a Camera. Two sample blocks of the selected species of 2×2×3 cm have been taken to prepare the slides. The selected samples have been soaked in water for two weeks before being prepared for slides. Using a microtome (Model LEICA SM 2000R-SCHITTEN MIKROTOM), the specimens have been taken from transverse, radial, and tangential sections of the samples in the range of 10–15 μm thickness.

Staining and Mounting. The wood sections have been dehydrated in 50 % alcohol, then stained with safranin in 50 % alcohol to remove moisture and color. Further dehydration involved washing in 70 and 90 % alcohol, followed by absolute alcohol. After mixing with absolute alcohol and xylene, they have been kept in absolute alcohol again. Finally, they have been kept in xylene and mounted on slides using Canada balsam. After drying for 24 h, the prepared slides have been observed under the microscope.

Anatomical Measurements. Under a 40× magnification light microscope, anatomical measurements have been determined. The research division of the State Timber Corporation has been used to obtain the anatomical photographs and their measurements. Vessel diameter and vessels per 3.14 mm^2 have been measured in the transverse sections, and ray height, ray width, and rays per 3.14 mm^2 have been measured in the tangential sections of timber species using the prepared anatomy photos. One set of slides from each species have been prepared and the measurements have been taken for each sample. All the data of quantitative anatomical features have been tabulated. Mean tangential vessel diameter: an average of 10 measurements has been taken from the anatomical photos using Micrometrics SE Premium 4 software. Mean ray height and ray width: an average of 10 measurements has been taken from the anatomical photos using Micrometrics SE Premium 4 software.

The parameters have been calculated by:

$$\text{Ray area} = \text{Width of ray} \times \text{Height of ray}; \quad (1)$$

$$\text{Total ray area} = \text{Ray area} \times \text{Number of rays}; \quad (2)$$

$$\text{Vessel area} = \pi(\text{Tangential vessel diameter} / 2)^2; \quad (3)$$

$$\text{Total vessel area} = \text{Vessel area} \times \text{Number of vessels}. \quad (4)$$

Determination of the Wood Density. Two samples blocks of lesser-known timber species of 2×2×2 cm have been prepared, labeled, and cleaned to remove saw dust, mud, or any other dirty particles. Wood density has been measured by a densitometer and using the water displacement method (Archimedes' law). The weight of a water-filled beaker has been measured. A timber sample has been submerged in water to a constant depth and the final weight of the beaker has been measured. The timber samples have been oven-dried at 103 °C for 2 days until a constant weight has been reached. After cooling in a desiccator, the dry weight of each sample has been measured using an electronic balance (g).

Calculating the Wood Density. Consistent procedure has been maintained for each timber sample and density has been calculated by using the following equations:

$$\text{Timber weight} = \text{Final beaker weight} - \text{Initial beaker weight}; \quad (5)$$

$$\text{Density at 0 \% moisture level} = \text{Oven dry weight of a timber sample} / \text{Timber sample weight} \times \text{Density of water (1,000 kg/m}^3\text{)}; \quad (6)$$

$$\text{Density at 12 \% moisture level} = \text{Density at 0 \% moisture level} \times 112 / 100 \text{ kg/m}^3. \quad (7)$$

Boron Treatment through the Impregnation Method. The timber samples of each species of 5×10×13 cm have been prepared and labeled for boron treatment. Prior to treatment, the surfaces have been meticulously cleaned to remove sawdust and any other contaminants. A moisture meter has been used to record the moisture content of each sample at room temperature and 80 % relative humidity. Finally, the samples have been weighed using a precision balance (A&D Weighing GF-3000) to obtain their initial weights before boron treatment.

Boron Treatment through the Impregnation Process. Treatability has been tested for the samples of lesser-known timber species having the thickness of 5 cm and 10 cm and the length of 13 cm. Six replicates of each lesser-known timber species have been tested with an 8 % borax and boric acid equivalent solution of boric acid and borax in the ratio of 1 : 1.5 in a commercial treatment plant at Boossa Timber Corporation. The treatment cylinder has had the length of 3 m and the diameter of 1.2 m. All the timber samples have been placed into the treatment cylinder with a full load of sawn *Pinus* wood. The impregnation process steps have been as follows. The timber sample has been placed into the treatment vessel and subjected to a vacuum pressure of 635 mmHg for 20 min, removing air for deeper preservative penetration. A heated (60 °C) boron preservative has then been added to the vessel, its warmth facilitating smoother flow and better wood absorption. Next, the vessel has been pressurized to 12 bar for 45 min, effectively forcing the preservative into the wood. Removing excess preservative, a final 45-minute vacuum of 635 mmHg has ensured complete extraction. Now, treated with the boron preservative, the timber sample has been ready for its protected life.

Determination of the Chemical Retention. Retention is the amount of chemical preservatives that are kept in a unit volume of wood, which is measured in kilograms per cubic meter. Then the weight gain has been obtained and the chemical retention calculated by following the equation:

$$\text{Chemical Retention (kg/m}^3\text{)} = G \cdot C \cdot 10^3 / V, \quad (8)$$

where G – the amount of the solution absorbed by timber that is calculated by T_2-T_1; T_2 – the weight of wood after the impregnation (g); T_1 – the weight of wood before the impregnation (g); C – the solution concentration as percentage; V – the volume of the sample (cm^3).

Determination of Boron Penetrability. To uncover the penetration depth of a preservative, a turmeric solution has been applied, revealing bright yellow areas. Subsequently, treating these yellow zones with a salicylic acid solution triggers a color shift: yellow turning to red signifies the presence of boron, indicating the preservative's penetration depth. This simple method provides a visual indicator of the preservative's effectiveness.

Results and Discussion

Moisture Content. The moisture content of wood, expressed as a percentage of its dry weight, reveals the actual amount of water it contains. Before undergoing any treatment, wood typically requires its moisture content lowered to an acceptable range of 10–25 %. As shown in Fig. 1, the average moisture content varied considerably among the 20 different timber species analyzed. Interestingly, *Harpullia arborea* (Na-Imbul) possessed the lowest average moisture content, while *Rhizophora mucronata* (Maha-Kadol) exhibited the highest. This information highlights the diverse moisture levels inherent in different wood species. Understanding the wood moisture content is crucial for ensuring its long-term performance and durability. While managing moisture content without boron treatment is possible, it requires careful consideration of environmental factors and implementation of the appropriate control measures. Boron treatment offers a valuable solution for regulating moisture content, providing numerous benefits for wood preservation and enhancing its stability and resistance to decay.

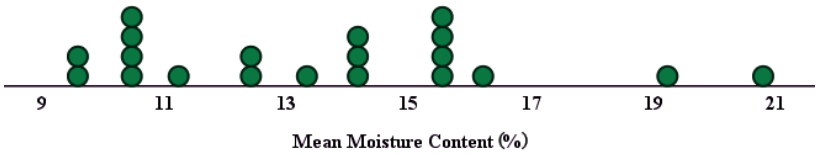


Fig. 1. The moisture content of timber samples

Fig. 1 shows that the moisture content ranges from 9 to 21 %. The mean moisture content is 10 %.

Density. Wood density, the dry mass per unit volume, is a crucial property that significantly influences various wood characteristics, including strength, stability, durability, and fire resistance. While it exhibits inherent variation across different species, it also changes dynamically throughout a tree's developmental stages. Wood density, the dry mass per unit volume, varies depending on the tree's stage of development and can be seen as a range for a specific timber species. Fig. 2, calculated using densitometers and water displacement, shows the diverse mean densities of lesser-known timber species, with *Memecylon umbellatum* (Kora-Kaha) exhibiting the highest and *Cananga odorata* (Wana-Sapu) the lowest. This information underscores wood density's role in selecting suitable wood for specific applications. Understanding the variation in wood density with tree development is crucial for various applications. It allows for the selection of the appropriate wood for specific uses, optimization of forest management practices, and development of effective wood processing techniques [12].

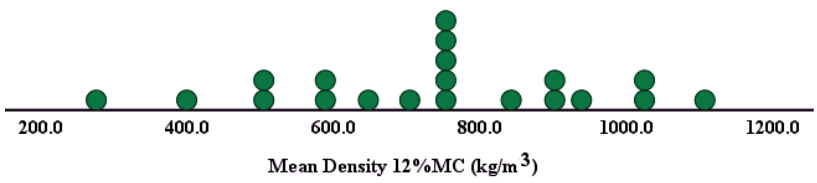


Fig. 2. The density of timber species

Fig. 2 shows the Mean Dencity 12 % MC (kg/m^3). The mean density is 12 % and it is difficult to say whether the data is symmetrical or skewed. The range varies from 9 to 21 % with a range of 12 %.

Development of the Classification Scale for Boron Retention. Highest boron retention has been recorded from *Cananga odorata* (Wana-Sapu) and the lowest boron retention has been recorded from *Bridelia moonii* (Path-Kela). Based on the degree of treatability, 20 species of lesser-known timber have been chosen and categorized into 4 groups: very difficult, moderately difficult, easy and very easy to treat. Similar grading ratings for treatability have also been produced in a prior study. It is preferable to create a categorization scale with 4 categories due to the simplicity of chemical application and application method.

Chemical retention classification has been prepared as follows (classes):

1) boron retention less than 3.5 kg/m^3 – very difficult to treat: *Grewia helicterifolia* (Bora-Daminiya), *Harpullia arborea* (Na-Imbul), *Bridelia moonii* (Path-Kela);

2) boron retention in between 3.5 and 7 kg/m^3 – moderately difficult to treat: *Acacia mangium* (Acacia), *Stereospermum personatum* (Dunu-Madala), *Vitex altissima* (Kaha-Milla), *Margaritaria indica* (Karaw), *Dichrostachys cinerea* (Katu-Andara), *Memecylon umbellatum* (Kora-Kaha);

3) boron retention in between 7 and 15 kg/m^3– easy to treat: *Allaeanthus zeylanicus* (Aladu), *Syzygium rubicundum* (Kurumbettiya), *Rhizophora mucronata* (Maha-Kadol), *Bhesa ceylanica* (Pelan);

4) boron retention higher than 15 kg/m^3– very easy to treat: *Araucaria columnaris* (Arawkeriya), *Ficus racemose* (Attikka), *Mitragyna parvifolia* (Helamba), *Cullenia ceylanica* (Katu-Boda), *Ficus benghalensis* (Maha-Nuga), *Alstonia scholaris* (Ruk-Aththana), *Cananga odorata* (Wana-Sapu).

The following categories have been used to classify 20 species under study.

Relationship between the Boron Treatability and Density. Using the densitometer and the water displacement method, density has been achieved and the values compared. Those values have been nearly similar. Depending on the stage of a tree growth, the density might change. Fig. 3 has shown that there has been a strong negative relationship between the density and boron retention.

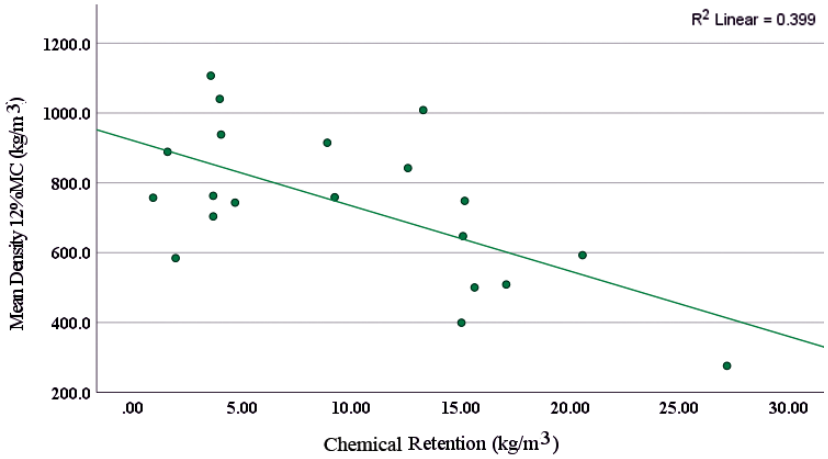


Fig. 3. The relationship between the boron treatability and density

Relationship between the Boron Treatability, Total Vessel Area and Total Ray Area. Various types of wood have different numbers, positions and sizes of rays and vessels. Table 2 has shown the Pearson correlation values and probability values of boron retention with the total vessel area and total ray area.

Table 2

The anatomy measurements of lesser-known timber species

Common name	Vessels			Rays			
	Mean diameter (μm), N = 10	Number per mm^2	Total area per mm^2 (μm^2)	Mean height (μm), N = 10	Mean width (μm), N = 10	Number per mm^2	Total area per mm^2 (μm^2)
Acacia	130.76	7	98400.97	208.28	14.20	26	76294.89
Aladu	104.86	4	38520.42	454.08	27.79	9	112508.12
Arawkeriya	0.00	0	0.00	341.10	21.44	7	48905.27
Attikka	101.55	4	30964.14	401.30	40.39	11	185835.18
Bora-Daminiya	69.50	36	136570.86	345.55	21.08	23	169344.43
Dunu-Madala	145.60	6	100787.20	298.55	33.40	9	88927.64
Helamba	113.40	13	128701.26	534.81	31.62	7	113097.85
Kaha-Milla	128.25	5	61733.47	314.61	30.00	15	138246.40
Karaw	87.11	18	104424.84	956.40	43.40	6	264404.51
Katu-Andara	71.53	15	60167.33	545.78	26.34	17	238027.44
Katu-Boda	150.33	4	73511.98	828.11	48.73	9	346978.78
Kora-Kaha	30.12	63	44726.90	124.65	9.00	129	144698.42
Kurumbettiya	88.95	10	61377.35	634.46	18.10	15	175558.20
Maha-Kadol	54.47	19	44538.67	1362.57	51.43	4	267809.50
Maha-Nuga	196.18	2	57781.83	644.77	63.93	9	367583.10
Na-Imbul	125.36	1	15730.43	337.80	17.98	32	195329.80
Path-Kela	100.31	14	108270.27	522.84	44.48	9	199966.40
Pelan	77.37	11	52423.47	411.03	27.04	7	74320.16
Ruk-Aththana	136.10	6	88062.72	503.29	35.99	12	213460.30
Wana-Sapu	218.07	2	83293.09	1281.45	55.85	3	205126.40

The relationship between the retention and total vessel area has been negative (Fig. 4), while the relationship between the retention and total ray area has been positive (Fig. 5).

Anatomical Measurements of Lesser-Known Timber Species Taken by Micrometrics Premium 4 Software. The highest mean diameter of vessels has been registered in *Ficus benghalensis* (Maha-Nuga), but there are only 2 vessels per mm^2. The lowest mean diameter of vessels has been registered in *Memecylon umbellatum*

(Kora-Kaha) but it has the highest number of vessels per mm^2. *Grewia helicterifolia* (Bora-Daminiya) has the highest mean total vessel area, whereas *Harpullia arborea* (Na-Imbul) has the lowest mean total vessel area. *Araucaria columnaris* (Arawkeriya) vessel area is zero. Because Arawkeriya is a softwood tree, it does not have vessels.

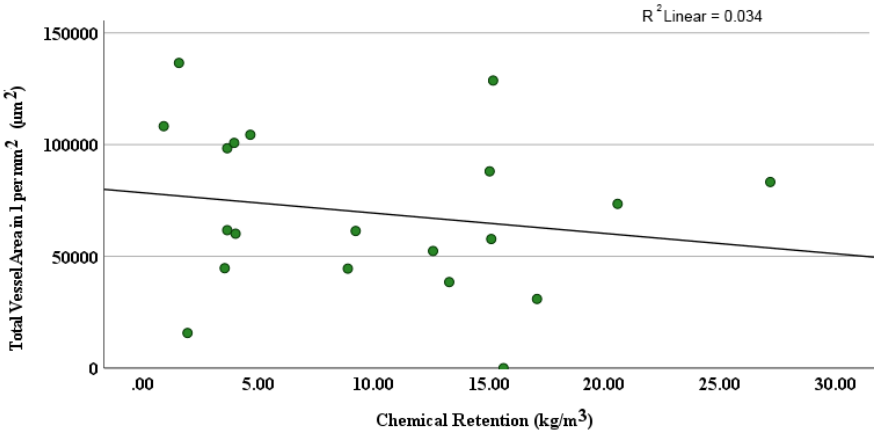


Fig. 4. The relationship between the total vessel area and boron retention

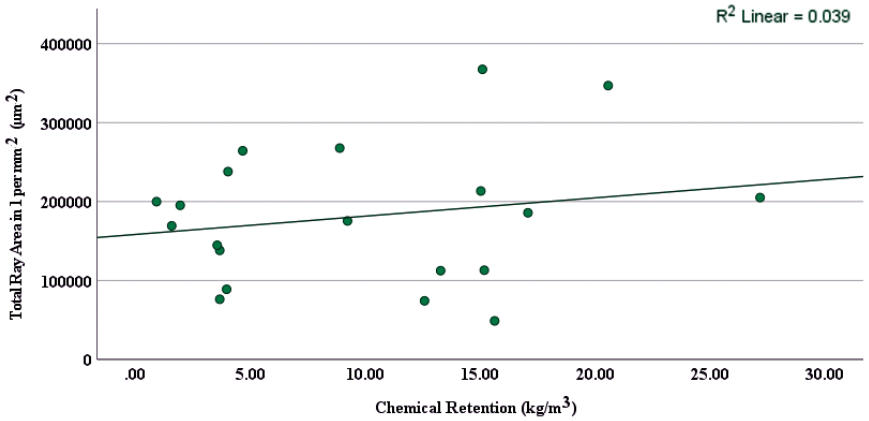


Fig. 5. The relationship between the total ray area and boron retention

Rhizophora mucronata (Maha-Kadol) has the highest mean height of rays, but there are only 4 rays per mm^2. The lowest mean height and width of rays has been registered in *Memecylon umbellatum* (Kora-Kaha), but it has the hightest number of rays per mm^2. The highest mean width of rays has been registered in *Ficus benghalensis* (Maha-Nuga), but there are only 9 rays per mm^2. *Ficus benghalensis* (Maha-Nuga) has the highest mean total ray area, whereas *Araucaria columnaris* (Arawkeriya) has the lowest mean total ray area (Fig. 6).

The effectiveness of boron-based wood preservatives depends heavily on the penetration depth of the boron compound into the wood structure. This penetration determines the extent of protection against decay and other biological attacks. Currently, no standardized classification system specifically exists for boron penetration in wood. Developing a reliable and consistent classification scale for boron penetration offers several advantages. Enhanced evaluation is a key factor and a standardized

scale allows for objective and consistent assessment across different laboratories, reducing subjectivity and ensuring data accuracy. Improved communication as a common language for describing boron penetration facilitates communication and collaboration between researchers, wood treatment professionals, and end users. Treatment processes can be optimized by accurately measuring penetration depth to achieve the desired level of protection while minimizing boron usage [13]. Table 3 explains the development of classification for penetration of boron. It is a novel concept to the classification scale for penetration of boron.

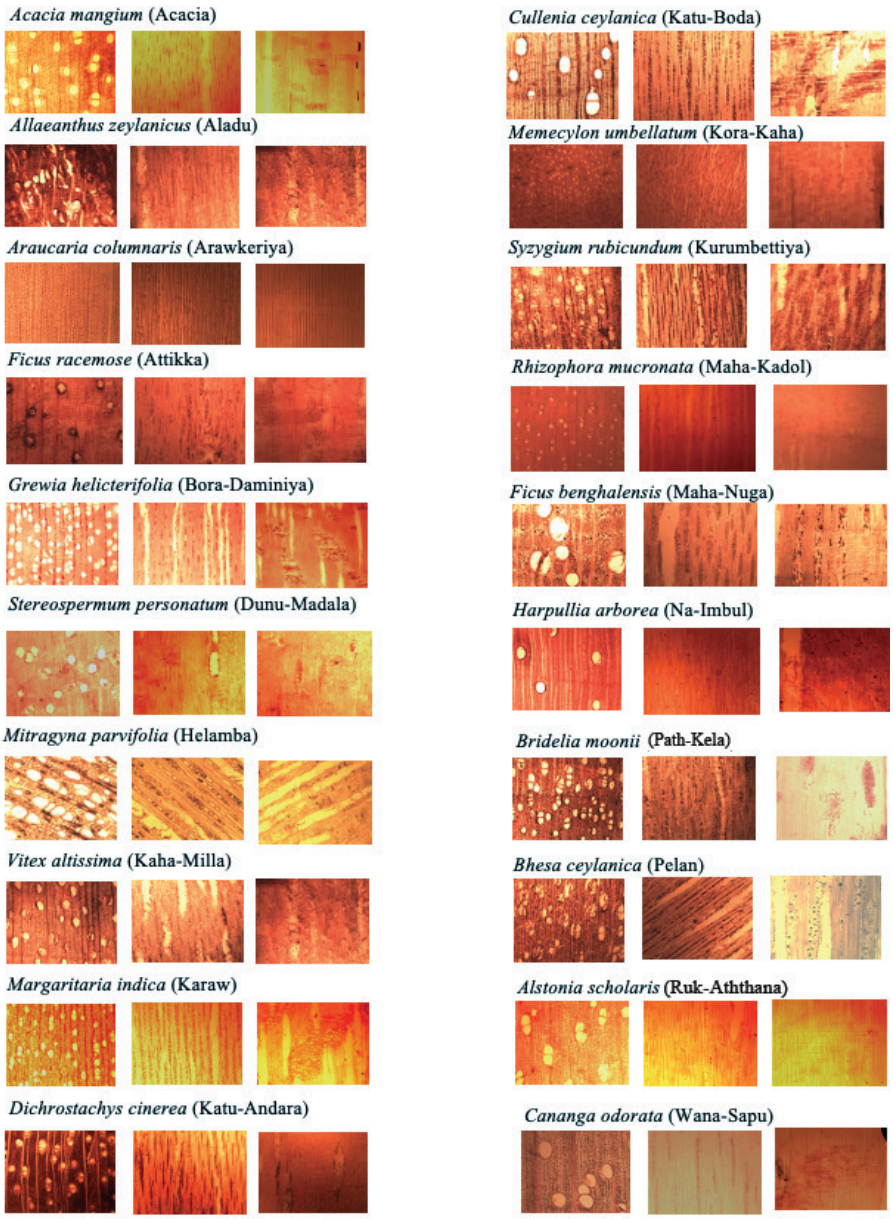
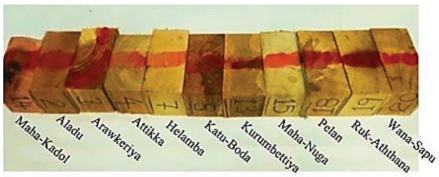
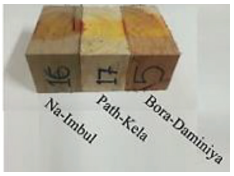


Fig. 6. The microscopic photos of lesser-known timber species (photographic representation of anatomical features of the transverse section (T.S) in the left hand panel, the tangential longitudinal section (T.L.S) in the middle panel and the radial longitudinal section (R.L.S) in the right hand panel)

Table 3

The development of the classification scale for penetration of boron

Penetration category	Timber species
Fully penetrated 	*Rhizophora mucronata* (Maha-Kadol) *Allaeanthus zeylanicus* (Aladu) *Araucaria columnaris* (Arawkeriya) *Ficus racemose* (Attikka) *Mitragyna parvifolia* (Helamba) *Cullenia ceylanica* (Katu-Boda) *Syzygium rubicundum* (Kurumbettiya) *Ficus benghalensis* (Maha-Nuga) *Bhesa ceylanica* (Pelan) *Alstonia scholaris* (Ruk-Aththana) *Cananga odorata* (Wana-Sapu)
Partially penetrated (penetrated more than 5 mm but not fully)	*Acacia mangium* (Acacia) *Stereospermum personatum* (Dunu-Madala) *Margaritaria indica (*Karaw) *Vitex altissima* (Kaha-Milla) *Dichrostachys cinerea* (Katu-Andara) *Memecylon umbellatum* (Kora-Kaha)
Penetrated less than 5 mm 	*Harpullia arborea* (Na-Imbul) *Bridelia moonii* (Path-Kela) *Grewia helicterifolia* (Bora-Daminiya)

Effectively managing boron treatment in wood preservation requires reliable methods for evaluating the retention and penetration of the boron compound within the wood structure. This is crucial for ensuring the desired level of protection against decay and other biological attacks. Currently, there is no standardized classification scale specifically for boron retention and penetration in wood. The existing methods rely on qualitative descriptions or semi-quantitative scales, which can be subjective and lack precision. This can lead to inconsistencies in treatment evaluation and hinder effective decision-making. In this study a 4 tier classification system has been developed (Table 4). By addressing these considerations and engaging in collaborative efforts, the development of a robust classification scale for boron retention and penetration can significantly contribute to the advancement of wood preservation technologies and ensure the long-term durability and performance of wood products.

Table 4

The development of the classification scale for retention and penetration of boron

Class	Boron retention (kg/m³)	Ability to treat	Lesser-known timber species	Boron penetration
01	Less than 3.5	Very difficult to treat	*Grewia helicterifolia* (Bora-Daminiya) *Harpullia arborea* (Na-Imbul) *Bridelia moonii* (Path-Kela)	Penetrated less than 5 mm
02	In between 3.5–7	Moderately difficult to treat	*Acacia mangium* (Acacia) *Stereospermum personatum* (Dunu-Madala) *Vitex altissima* (Kaha-Milla) *Margaritaria indica (*Karaw) *Dichrostachys cinerea* (Katu-Andara) *Memecylon umbellatum* (Kora-Kaha)	Partially penetrated (penetrated more than 5 mm but not fully)
03	In between 7–15	Easy to treat	*Allaeanthus zeylanicus* (Aladu) *Syzygium rubicundum* (Kurumbettiya) *Rhizophora mucronata* (Maha-Kadol) *Bhesa ceylanica* (Pelan)	Fully penetrated
04	Higher than 15	Very easy to treat	*Araucaria columnaris* (Arawkeriya) *Ficus racemose* (Attikka) *Mitragyna parvifolia* (Helamba) *Cullenia ceylanica* (Katu-Boda) *Ficus benghalensis* (Maha-Nuga) *Alstonia scholaris* (Ruk-Aththana) *Cananga odorata* (Wana-Sapu)	

Forest stands, defined as a group of trees with similar characteristics, exhibit a complex interplay between tree age, growing conditions, density, and ultimately, their homogeneity. The stands with a single age class and consistent growing conditions, like fertile soil and ample water, tend to be more homogeneous. However, the competition for resources in dense stands creates variations in their size and health, reducing uniformity. Foresters can manipulate density through thinning to promote a more even stand, but perfect homogeneity is not always desirable. A balance between some variation, which fosters a resilient ecosystem, and a degree of uniformity, which can be beneficial for timber production, is often the target for sustainable forest management.

Conclusion

Lesser-known timber species have been categorized into four groups for boron treatability known as class 01 – very difficult to treat (retention less than 3.5 kg/m³); class 02 – moderately difficult to treat (retention in between 3.5 and 7 kg/m³); class 03 – easy to treat (retention in between 7 and 15 kg/m³); class 04 – very easy to treat (retention higher than 15 kg/m³). According to the above classification seven lesser-known timber species such as *Araucaria columnaris* (Arawkeriya), *Ficus racemose*

(Attikka), *Mitragyna parvifolia* (Helamba), *Cullenia ceylanica* (Katu-Boda), *Ficus benghalensis* (Maha-Nuga), *Alstonia scholaris* (Ruk-Aththana) and *Cananga odorata* (Wana-Sapu) belong to class 03 – very easy to treat. Lesser-known timber species have been categorized into three groups according to boron penetration level. Those are fully penetrated, partially penetrated (penetrated more than 5 mm but not fully) and penetrated less than 5 mm. Comparing the two classifications together, species in class 01 belong to the group of those penetrated less than 5 mm, species in class 02 belong to the group of partially penetrated ones, and species in classes 03 and 04 belong to the group of fully penetrated ones. The relationship between the treatability and wood density has been a strong negative linear one. The relationship between the treatability and total ray area has been positive, while the relationship between the treatability and total vessel area has been negative. Both relationships have been weak.

REFERENCES

1. Alapieti T., Mikkola R., Pasanen P., Salonen H. The Influence of Wooden Interior Materials on Indoor Environment: a Review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2020, vol. 78, pp. 617–634. https://doi.org/10.1007/s00107-020-01532-x

2. Ayanleye S., Udele K., Nasir V., Zhang X., Militz H. Durability and Protection of Mass Timber Structures: A Review. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 46, art. no. 103731. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103731

3. Brischke C. 5 – Timber. *Long-Term Performance and Durability of Masonry Structures*, 2019, pp. 129–168. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102110-1.00005-4

4. Broda M. Natural Compounds for Wood Protection against Fungi – A Review. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 15, art. no. 3538. https://doi.org/10.3390/molecules25153538

5. Bukauskas A., Mayencourt P., Shepherd P., Sharma B., Mueller C., Walker P., Bregulla J. Whole Timber Construction: A State of the Art Review. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 213, pp. 748–769. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043

6. Cappellazzi J., Konkler M.J., Sinha A., Morrell J.J. Potential for Decay in Mass Timber Elements: A Review of the Risks and Identifying Possible Solutions. *Wood Material Science & Engineering*, 2020, vol. 15, iss. 6, pp. 351–360. https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1720804

7. Corradi M., Osofero A.I., Borri A. Repair and Reinforcement of Historic Timber Structures with Stainless Steel – A Review. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 1, art. no. 106. https://doi.org/10.3390/met9010106

8. Crini G., Lichtfouse E., Chanet G., Morin-Crini N. Applications of Hemp in Textiles, Paper Industry, Insulation and Building Materials, Horticulture, Animal Nutrition, Food and Beverages, Nutraceuticals, Cosmetics and Hygiene, Medicine, Agrochemistry, Energy Production and Environment: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, vol. 18, pp. 1451–1476. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01029-2

9. Dias A.M.A., Santos P.G.G., Dias A.M.P.G., Silvestre J.D., Brito de J. Life Cycle Assessment of a Preservative Treated Wooden Deck. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, vol. 17, iss. 6, pp. 502–512. https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1897673

10. Duan Z., Huang Q., Zhang Q. Life Cycle Assessment of Mass Timber Construction: A Review. *Building and Environment*, 2022, vol. 221, art. no. 109320. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109320

11. Evans P.D., Matsunaga H., Preston A.F., Kewish C.M. Wood Protection for Carbon Sequestration – A Review of Existing Approaches and Future Directions. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 181–198. https://doi.org/10.1007/s40725-022-00166-x

12. Fathi H., Nasir V., Kazemirad S. Prediction of the Mechanical Properties of Wood Using Guided Wave Propagation and Machine Learning. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 262, art. no. 120848. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120848

13. Ghani R.S.M. A Review of Different Barriers and Additives to Reduce Boron Movement in Boron Dual Treated Wood. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 160, art. no. 106523. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106523

14. Järvinen J., Ilgın H.E., Karjalainen M. Wood Preservation Practices and Future Outlook: Perspectives of Experts from Finland. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 7, art. no. 1044. https://doi.org/10.3390/f13071044

15. Khademibami L., Bobadilha G.S. Recent Developments Studies on Wood Protection Research in Academia: A Review. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2022, vol. 5, art. no. 793177. https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.793177

16. Narasimha Murthy K., Chawla V.K., Upadhayay V.K., Prakash V. Evaluation of New Boron Fixation System for Wood Preservation. *International Journal of Engineering Research And Management (IJERM)*, 2019, vol. 6, iss. 8, pp. 28–31.

17. Pournou A. Wood Deterioration by Insects. *Biodeterioration of Wooden Cultural Heritage: Organisms and Decay Mechanisms in Aquatic and Terrestrial Ecosystems*. Springer, Cham, 2020, pp. 425–526. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46504-9_7

18. Sürdem S., Eseroglu C., Yildiz S., Sögütlü C., Yörükoglu A. Combustion and Decay Resistance Performance of Scots Pine Treated with Boron and Copper Based Wood Preservatives. *Drvna Industrija*, 2022, vol. 73, no. 4, pp. 397–404. https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2125

19. Veselov V., Abu-Khasan M., Egorov V. Innovative Designs of Wooden Beams in Conditions Far North. *IOP Conference Series*: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 753, art. no. 022024. https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/2/022024

20. Younis A., Dodoo A. Cross-Laminated Timber for Building Construction: A Life-Cycle-Assessment Overview. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 52, art. no. 104482. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104482

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 621.365.5
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-175-183

Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно

В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: Q-1051-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2583-3012*
И.И. Соловьев*✉*, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: ABE-7412-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2008-7073*
Е.В. Сазанова, канд. экон. наук, доц.; *ResearcherID: G-8650-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5731-7517*
Н.Г. Пономарева, канд. техн. наук; *ResearcherID: A-5693-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6210-5631*
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru✉, e.sazanova@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

Поступила в редакцию 24.02.24 / Одобрена после рецензирования 16.05.24 / Принята к печати 19.05.24

Аннотация. Работоспособность ленточной пилы в значительной степени определяется ее устойчивостью и долговечностью – возможностью длительно сохранять эксплуатационные свойства под влиянием внешних и внутренних факторов до наступления предельного состояния, заканчивающегося потерей устойчивости и разрушением полотна пилы. В процессе работы полотно ленточной пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов, которые изменяют ее напряженное состояние. Долговечность и устойчивость ленточной пилы зависят от величины и характера распределения суммарных напряжений в наиболее нагруженном поперечном сечении полотна. Итоговое напряжение на участке полотна, определяемом поперечным сечением, складывается из внутренних напряжений и напряжений от внешних сил: натяжения пилы, изгиба полотна на шкивах, действия центробежных сил, вальцевания полотна, нагрева полотна, наклона шкивов, сил резания, прочих неучтенных напряжений. Многочисленными исследованиями установлено, что разрушение ленточных пил носит усталостный характер, обусловливаемый в основном аккумуляцией напряжений в полотне пилы под воздействием постоянных сил натяжения полотна и переменного циклического напряжения изгиба полотна на шкивах. Одним из направлений повышения долговечности ленточной пилы является уменьшение амплитуды циклических напряжений изгиба в полотне созданием внутренних компенсирующих контрнаправленных напряжений. В результате приведенного в статье анализа способов создания внутренних компенсирующих напряжений в ленточной пиле механическим или длительным высокотемпературным воздействием на все полотно пилы отмечено, что такие подходы ограничивают долговечность инструмента, снижают твердость материала и стойкость режущей кромки зуба. Предложено формировать поля внутренних остаточных компенсирующих напряжений в полотне ленточной пилы теплофизическим воздействием, заключающимся в создании локальных полей остаточных напряжений в полотне пилы кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на массив чередующихся поперечно расположенных по полотну пилы миниполосовых участков.

© Мелехов В.И., Соловьев И.И., Сазанова Е.В., Пономарева Н.Г., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: ленточная пила, миниполосовой участок, индукционный нагрев, термопластические напряжения, долговечность, устойчивость

Для цитирования: Мелехов В.И., Соловьев И.И., Сазанова Е.В., Пономарева Н.Г. Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 175–183. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-175-183

Original article

Improving the Performance of Band Saws by Local Thermophysical Effects on the Blade

Vladimir I. Melekhov, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: Q-1051-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2583-3012*
Ivan I. Solovev ✉***,*** *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: ABE-7412-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2008-7073*
Ekaterina V. Sazanova, *Candidate of Economics, Assoc. Prof.; ResearcherID: G-8650-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5731-7517*
Natalya G. Ponomareva, *Candidate of Engineering; ResearcherID: A-5693-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6210-5631*
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru ✉, e.sazanova@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

Received on February 24, 2024 / Approved after reviewing on May 16, 2024 / Accepted on May 19, 2024

Abstract. The performance of a band saw is largely determined by stability and durability – the ability to maintain operational properties for a long time under the influence of external and internal factors until the onset of a limiting state, ending with loss of stability and destruction of the saw blade. During operation, the band saw blade is subject to the complex effects of force and temperature factors that change its stress state. The durability and stability of a band saw depends on the magnitude and nature of the distribution of total stresses in the most loaded cross-section of the blade. The final stress on the section of the blade, determined by the cross section, is the sum of internal stresses and external forces: saw tension, bending of the blade on the pulleys, centrifugal forces, blade rolling, blade heating, pulley tilt, cutting forces, and other unaccounted stresses. Numerous studies have established that the destruction of band saws is of a fatigue nature, caused mainly by the accumulation of stresses in the saw blade under the influence of constant blade tension forces and alternating cyclic bending stress of the blade on the pulleys. One of the ways to increase the durability of a band saw is to reduce the amplitude of cyclic bending stresses in the blade by creating internal compensating counter-directional stresses. As a result of the analysis given in the article of the methods for creating internal compensating stresses in a band saw by mechanical or long-term high temperature exposure to the entire saw blade, it has been noted that such approaches limit the durability of the tool, reduce the hardness of the material and the durability of the cutting edge of the saw tooth. It is proposed to form fields of internal residual compensating stresses in the band saw blade by thermophysical effect, which consists in creating local fields of residual stresses in the saw blade by a short-term (1–2 s) concentrated thermal action on an array of alternating mini-strip sections located transversely along the saw blade.

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Keywords: band saw, mini-strip section, induction heating, thermoplastic stresses, durability, stability

For citation: Melekhov V.I., Solovev I.I., Sazanova E.V., Ponomareva N.G. Improving the Performance of Band Saws by Local Thermophysical Effects on the Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 175–183. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-175-183

Введение

На ленточнопильных станках раскрой древесных сортиментов производят движущейся тонкой стальной бесконечной лентой с зубчатой кромкой, установленной на шкивах. Работоспособность ленточной пилы в значительной степени определяется ее устойчивостью и долговечностью – свойством инструмента длительно сохранять работоспособность под действием внешних и внутренних факторов до наступления предельного состояния, приводящего к потере устойчивости и разрушению полотна пилы.

При работе полотно ленточной пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов, изменяющих ее напряженное состояние. Долговечность и устойчивость ленточной пилы определяются величиной и характером распределения суммарных напряжений в наиболее нагруженном поперечном сечении полотна. Итоговое напряжение на этом участке полотна складывается из внутренних напряжений и напряжений от внешних сил: натяжения пилы, изгиба полотна на шкивах, действия центробежных сил, вальцевания полотна, нагрева полотна, наклона шкивов, сил резания, прочих неучтенных напряжений [5, 14].

Проведенными ранее исследованиями установлено, что разрушение ленточных пил носит усталостный характер, определяемый в основном аккумуляцией напряжений в полотне пилы под воздействием постоянных сил натяжения полотна и переменного циклического напряжения изгиба полотна на шкивах. Величина постоянных и циклических напряжений в зависимости от размеров сечения полотна, качества изготовления и подготовки пилы может изменяться в пределах 50–100 и 180–300 МПа соответственно и в целом составляет 60–75 % от общих напряжений, возникающих в полотне пилы [5, 6, 8, 14].

Суммарная величина напряжений в полотне пилы не должна превышать предел усталостной прочности материала полотна, который при коэффициенте запаса прочности $k = 2$ составляет 360–500 МПа [1–4].

Циклические напряжения изгиба в полотне определяются из соотношения [14]

$$\sigma_{изг} = E\frac{s}{D+s},$$

где E – модуль упругости; s – толщина пилы; D – диаметр шкивов.

Уменьшение циклических напряжений изгиба в полотне может быть достигнуто увеличением диаметра шкивов D, уменьшением толщины полотна пилы s или применением сталей с улучшенными характеристиками, что позволяет повысить долговечность пилы [11].

Рост диаметра шкивов увеличивает металлоемкость и габариты оборудования. При уменьшении толщины пилы s снижается жесткость и устойчивость инструмента.

Г.Ф. Прокофьев и И.И. Иванкин [13] разработали конструкцию станка с пилой, движущейся по криволинейным бесконтактным аэростатическим направляющим с большим радиусом кривизны, что позволило значительно снизить напряжения изгиба в полотне.

Одним из направлений повышения долговечности ленточной пилы является уменьшение амплитуды циклических напряжений изгиба в полотне созданием внутренних компенсирующих контрнаправленных напряжений. А.Ф. Дулевич и др. [7] предложили метод создания таких напряжений в наружных слоях ленточной пилы за счет предварительного упругопластического деформирования полотна. Ленточная пила обкатывается роликами на шкивах с меньшим, чем у рабочего шкива, диаметром с созданием механических напряжений от изгиба во внешних слоях полотна, превышающих предел текучести материала, и образованием остаточных напряжений сжатия. Полотно пилы принимает определенный меньшим шкивом радиус кривизны, и при установке пилы на рабочие шкивы станка остаточные напряжения сжатия в поверхностных слоях полотна компенсируют напряжения изгиба в полотне, снижая результирующие напряжения и способствуя повышению долговечности пилы. Одновременно следует учитывать, что механическое контактное воздействие на полотно пилы роликами с пластической деформацией металла может вызвать механическое повреждение полотна и ограничить долговечность инструмента.

В.Ф. Фонкин и В.В. Герасимов [15] предложили проводить подготовку пильных лент методом термической обработки полотен в предварительно упруго деформированном состоянии, исследовали пластическое деформирование (искривление) полотен ленточных пил в диапазонах температур и времени 500–600 °С и 5–20 мин соответственно. При установке ленточной пилы на шкивы полученные после обработки внутренние напряжения позволяют снизить амплитуду циклических напряжений изгиба, что приводит к повышению выносливости ленточных пил и способствует увеличению их долговечности.

Авторами статьи предложено формировать поля внутренних остаточных компенсирующих напряжений в полотне ленточной пилы теплофизическим методом [9], заключающимся в создании локальных полей остаточных напряжений в полотне пилы кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на поперечно расположенные по полотну пилы миниполосовые участки. Это обеспечивает равномерное распределение компенсирующих напряжений в материале инструмента по всему массиву миниполосового участка, однородность структуры полей напряжений.

Цель – обоснование предлагаемого метода повышения работоспособности ленточной пилы.

Объекты и методы исследования

При подготовке пилы (рис. 1) полотно условно поделено на звенья *1* длиной *b* миниполосовыми участками *2*, соединяющими зубчатую *3* и заднюю *4* кромки пилы. Такая звеньевая разбивка может быть условно сопоставлена с моделью шарнирно-цепной или ременной передачи. При сопоставлении с шарнирно-цепной передачей полученные после термообработки внутренние напряжения на границе между звеньями и миниполосовыми участками при установке ленточной пилы на шкивы (рис. 2) выполняют роль условных нано-

подвижных шарниров, обеспечивающих поворот звена на шкивах на угол α изгиба полотна, определяемого диаметром шкива *R*, а при сравнении с ременной передачей – роль дискретного взаимодействия между элементарными поперечными полосовыми участками ремня.

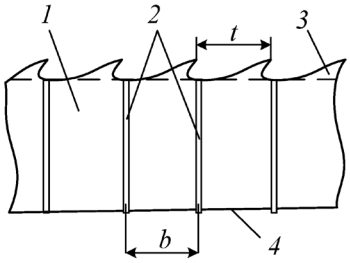


Рис. 1. Участок полотна ленточной пилы
Fig. 1. The section of a band saw blade

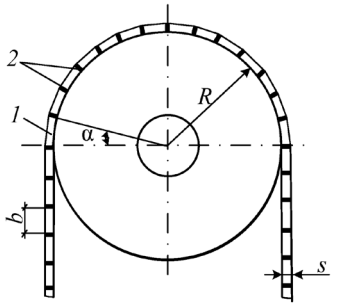


Рис. 2. Полотно ленточной пилы на шкиве
Fig. 2. The band saw blade on a pulley

Технология подготовки ленточной пилы к работе основывается на тепловом способе [1, 5, 16] создания внутренних компенсирующих напряжений в полотне пилы мощным импульсным кратковременным индукционным прогревом по всему сечению и объему поперечно расположенных миниполосовых участков. При локальном нагревании массива миниполосового участка на его границе со звеном полотна образуются нормальные разнонаправленные тепловые напряжения $\sigma_{теп}$, превышающие предел текучести материала $\sigma_{0,2}$ полотна. При этом в массиве миниполосового участка возникают вторичные термопластические остаточные деформации [1–4, 9, 12, 16–21], которые обеспечивают формирование на границе миниполосового участка *2* со звеном *1* полотна пилы внутренних остаточных термопластических напряжений $\sigma_{тпл}$, позволяющих частично компенсировать напряжения изгиба в полотне и увеличить ее долговечность (рис. 3).

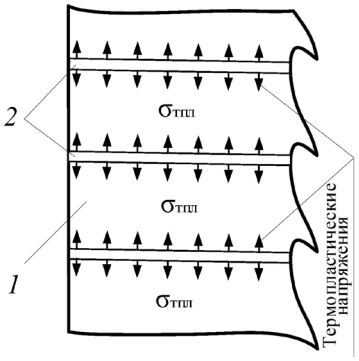


Рис. 3. Участок полотна ленточной пилы со следами термопластической обработки
Fig. 3. The band saw blade section with traces of thermoplastic processing

Количественная оценка компенсирующих остаточных термопластических напряжений при импульсном индукционном прогреве массива миниполосового участка полотна пилы выполнена по математической модели [10].

Смоделирован процесс формирования остаточных термопластических напряжений в полотне ленточной пилы. Материал полотна пилы – сталь инструментальная легированная 90ХФ с механическими характеристиками по ГОСТ 5950–2000: модуль упругости E = 196,1 ГПа; средний коэффициент линейного расширения $\alpha(t) = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/°С; предел текучести $\sigma_{0,2}$ определяется по зависимости предела текучести стали от температуры, МПа.

Тепловая обработка поперечных миниполосовых участков и создание компенсирующих напряжений в граничной зоне смежных участков полотна пилы производятся локальным индукционным нагревом.

При этом на границе миниполосового участка со звеном при нагреве его массива до 250–600 °С и последующем быстром охлаждении возникают нормальные направленные к граничной зоне смежных участков остаточные термопластические напряжения. При быстром охлаждении миниполосового участка твердость металла не меняется.

В массиве миниполосового участка, нагретого до температуры t, образуются тепловые напряжения [17]

$$\sigma_t(t) = -E\alpha(t)t.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости тепловых напряжений $\sigma_t(t)$ и предела текучести $\sigma_{0,2}(t)$ сталей 90ХФ приведены на рис. 4.

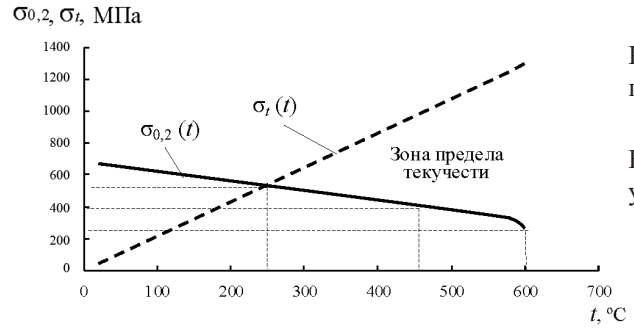


Рис. 4. Тепловые напряжения и предел текучести сталей 90ХФ в зависимости от температуры

Fig. 4. The thermal stresses and yield strength of 90KhF steels depending on temperature

Из анализа зависимостей следует, что при t = 250 °С и выше (зона предела текучести на рис. 4) тепловые напряжения σ_t превышают предел текучести $\sigma_{0,2}$ для стали 90ХФ, что способствует формированию компенсирующих остаточных термопластических напряжений.

Характер распределения напряжений изгиба $\sigma_{изг}$ и компенсирующих остаточных термопластических напряжений $\sigma_{тпл}$ в граничной зоне термообработанного миниполосового участка в подготовленном полотне пилы, установленном на шкивах станка, приведен на рис. 5.

Результирующие напряжения в полотне пилы определяются по формуле

$$\sigma_{рез} = \sigma_{изг} - \sigma_{тпл},$$

где $\sigma_{изг}$ – напряжения изгиба в полотне пилы, МПа; $\sigma_{тпл}$ – компенсирующие термопластические напряжения, МПа.

Циклические напряжения изгиба $\sigma_{изг}$ симметрично распределены относительно оси сечения полотна пилы (рис. 6, *а*) и изменяются в пределах 180–300 МПа в зависимости от толщины полотна и диаметра шкивов станка.

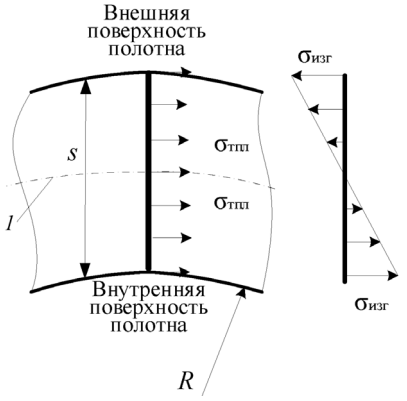


Рис. 5. Распределение напряжений изгиба и компенсирующих остаточных термопластических напряжений в граничной зоне термообработанного миниполосового участка: *1* – ось сечения полотна пилы

Fig. 5. The distribution of bending stresses and compensating residual thermoplastic stresses in the boundary zone of the heat-treated mini-strip section: *1* – cross-sectional axis of the saw blade

Компенсирующие термопластические напряжения $\sigma_{тпл}$ (рис. 6, *б*) при температурах нагрева 450–600 °С составляют 250–400 МПа (рис. 4).

Распределение результирующих напряжений $\sigma_{рез}$ относительно оси сечения полотна в подготовленной пиле, установленной на шкивах станка, при $\sigma_{изг}$ = 3000 МПа, $\sigma_{тпл}$ = 250 МПа показано на рис. 6, *в*.

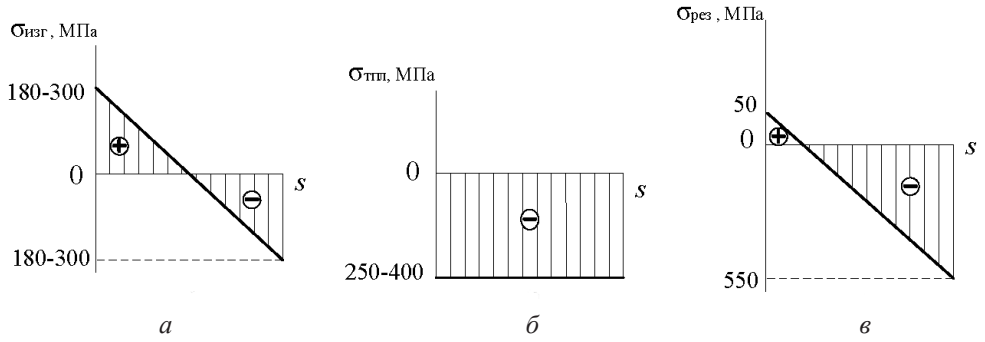


Рис. 6. Распределение напряжений в граничной зоне полосовых участков: *а* – симметричные напряжения изгиба; *б* – компенсирующие термопластические; *в* – результирующие

Fig. 6. The stress distribution in the boundary zone of the strip sections: *а* – symmetrical bending stresses; *б* – compensating thermoplastic; *в* – resultant

Заключение

Таким образом, повышение работоспособности ленточных пил может быть достигнуто формированием компенсирующих термопластических напряжений в полотне путем концентрированного импульсного кратковременного индукционного нагрева массива чередующихся поперечно расположенных по полотну пилы миниполосовых участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.

Birger I.A. *Residual Stresses*. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p. (In Russ.).

2. *Богатов А.А.* Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.

Bogatov A.A. *Mechanical Properties and Models of Metal Destruction*. Yekaterinburg, Ural State Technical university-Ural Polytechnic Institute Publ., 2002. 329 p. (In Russ.).

3. *Богатов А.А.* Остаточные напряжения и разрушение металла // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа им. проф. А.Ф. Головина: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2013. С. 95–101.

Bogatov A.A. Residual Stresses and Metal Failure. *Innovative Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. Ural Scientific and Pedagogical School named after Prof. A.F. Golovin*: Materials of the 6th International Scientific and Practical Conference. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2013, pp. 95–101. (In Russ.).

4. *Боровиков Е.М., Орлов Б.Ф.* Термический способ подготовки круглых пил к работе // Изв. вузов. Лесн. журн. 1974. № 6. С. 90–94.

Borovikov E.M., Orlov B.F. Thermal Method of Preparing Circular Saws for Work. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1974, no. 6, pp. 90–94. (In Russ.).

5. *Грубе А.Э.* Станки и инструменты по деревообработке. Т. II. Режущие инструменты по механической обработке древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 700 с.

Grube A.E. *Woodworking Machines and Tools*. Vol. II. Cutting Tools for Mechanical Conversion of Wood. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1949. 700 p. (In Russ.).

6. *Дулевич А.Ф., Киселев С.В.* Механизм разрушения ленточных пил // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2: Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2007. № 2. С. 283–286.

Dulevich A.F., Kiselev S.V. Mechanism of Destruction of Band Saws. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 2: Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forest and Woodworking Industry, 2007, no. 2, pp. 283–286. (In Russ.).

7. *Дулевич А.Ф., Макаревич С.С., Киселев С.В.* Способ повышения усталостной долговечности ленточных пил путем создания внутренних компенсирующих напряжений // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2: Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2009. № 2. С. 331–333.

Dulevich A.F., Makarevich S.S., Kiselev S.V. Method for Increasing the Fatigue Life of Band Saws by Creating Internal Compensating Stresses. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 2: Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forest and Woodworking Industry, 2009, no. 2, pp. 331–333. (In Russ.).

8. *Кондратюк А.А., Шилько В.К.* Оценка напряженного состояния ленточных пил // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2004. Т. 307, № 2. С. 138–142.

Kondratyuk A.A., Shil'ko V.K. Assessment of the Stress State of Band Saws. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2004, vol. 307, no. 2, pp. 138–142. (In Russ.).

9. *Мелехов В.И., Соловьев И.И.* Создание термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 87–91.

Melekhov V.I., Soloviev I.I. Creation of Thermoplastic Tension in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2010, no. 2, pp. 87–91. (In Russ.).

10. *Мелехов В.И., Соловьев И.И., Тюрикова Т.В., Пономарева Н.Г.* Повышение устойчивости дереворежущих пил термопластическим воздействием на распределение остаточных напряжений в полотне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 172–181.

Melekhov V.I., Solovev I.I., Tyurikova T.V., Ponomareva N.G. Improving the Stability of Wood-Cutting Saws by Thermoplastic Action on the Distribution of Residual Stresses in the Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 6, pp. 172–181. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-172-181

11. *Настенко А.А.* Подготовка ленточных пил. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 152 с.

Nastenko A.A. *Preparing Band Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 152 p. (In Russ.).

12. Патент 2614863 РФ, МПК C21D 9/24 (2006.01), C21D 1/10 (2006.01). Устройство для создания термопластических напряжений в полосовых пилах: № 2015141255: заявл. 28.09.2015: опубл. 29.03.2017 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев.

Melekhov V.I., Solovyov I.I. *A Device for Creating Thermoplastic Stresses in Band Saws*. Patent RF no. 2614863, 2017. (In Russ.).

13. *Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И.* Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках: моногр. / под ред. Г.Ф. Прокофьева. Архангельск: АГТУ, 2009. 379 с.

Prokofiev G.F., Ivankin I.I. *Increasing the Efficiency of Wood Sawing on Frame Saws and Band Saws*: Monograph. Ed. by G.F. Prokofiev. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2009. 379 p. (In Russ.).

14. *Феоктистов А.Е.* Ленточнопильные станки. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 151 с.

Feoktistov A.E. *Band Saw Machines*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 151 p. (In Russ.).

15. *Фонкин В.Ф., Герасимов В.В.* Повышение долговечности и устойчивости дереворежущих ленточных пил // Изв. вузов. Лесн. журн. 1984. № 6. С. 60–65.

Fonkin V.F., Gerasimov V.V. Increasing the Durability and Stability of Wood-Cutting Band Saws. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1984, no. 6, pp. 60–65. (In Russ.).

16. *Якунин Н.К., Якунин И.Н.* Подготовка к работе и эксплуатация ленточных пил. М.: МГУЛ, 2005. 362 с.

Yakunin N.K., Yakunin I.N. *Preparation for Work and Operation of Band Saws*. Mocsow, Moscow State Forest University Publ., 2005. 362 p. (In Russ.).

17. Bathe K.-J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 1982. 736 p.

18. Calladine C.R. *Theory of Shell Structures*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983. 812 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278

19. Holzweissig F., Meltzez G. *Meßtechnik der Maschinendynamik*. Leipzig, Fachbuchverlag, 1978. 418 p. (In Germ.).

20. Kuhnert E., Hunger P. Schwingungsstillung an Gattersägemaschinen. *Holzindustrie*, 1976, b. 2, pp. 58–60. (In Germ.).

21. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 882 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511810947

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 544.774.2
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-184-194

Аэрогели на основе диоксида кремния и лигносульфоната

О.С. Бровко*[1], *канд. хим. наук, вед. науч. сотр., доц.; *ResearcherID: AAF-5387-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1961-7831*
М.Е. Нечаева*[1]✉, *мл. науч. сотр., аспирант; *ResearcherID: AAL-7068-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6099-1358*
А.Д. Ивахнов*[1,2], *канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID: U-4822-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2822-9192*
И.А. Паламарчук*[1], *канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID: AAF-5454-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2947-1370*
Н.А. Горшкова*[1], *канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID: G-2949-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2036-2418*
Н.И. Богданович*[2], *д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: A-4662-2013, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5374-2943*
[1]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; brovko-olga@rambler.ru, m.e.nechaeva@yandex.ru✉, ivahnov-tema@yandex.ru, irpalamarchuk@mail.ru, nat.gorshkova@mail.ru
[2]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; ivahnov-tema@yandex.ru, n.bogdanovich@narfu.ru

Поступила в редакцию 26.03.24 / Одобрена после рецензирования 14.06.24 / Принята к печати 17.06.24

Аннотация. В настоящее время наблюдается значительный интерес к синтезу аэрогелей на основе природных полимеров. Применение биополимеров обусловлено их физико-химическими свойствами, доступностью, нетоксичностью, возобновляемостью сырья, необходимого для их производства. Такими характеристиками и обладают лигносульфонаты – сульфопроизводные природного биополимера лигнина, образующиеся в результате сульфитной (бисульфитной) делигнификации древесины. Особое внимание, сочетая свойства как органических, так и неорганических компонентов, привлекают композиционные аэрогельные материалы. Внедрение биополимеров в матрицу нанокомпозитных аэрогелей может улучшить их потребительские свойства. Целью данной работы является синтез аэрогелей на основе диоксида кремния и лигносульфоната натрия, изучение гелеобразования в системе «лигносульфонат натрия – диоксид кремния» и оценка влияния условий синтеза на формирование структуры аэрогельных материалов на их основе. Золь-гель синтезом получены гидрогели на основе компонентов различной химической природы лигносульфоната натрия и диоксида кремния. По-

© Бровко О.С., Нечаева М.Е., Ивахнов А.Д., Паламарчук И.А., Горшкова Н.А., Богданович Н.И., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

казано, что прочные упругие гели формируются при концентрации диоксида кремния свыше 175 г/л. Установлено, что модификация лигносульфонатов натрия диоксидом кремния приводит к агрегации частиц и увеличению их размера. Аэрогельные материалы на основе лигносульфоната натрия и диоксида кремния, полученные при различных мольных соотношениях компонентов (массовой доли лигносульфоната в системе), обладают развитой внутренней поверхностью, площадь удельной поверхности составляет 250…452 м²/г, общий объем пор варьирует от 0,84 до 2,00 см³/г. Показано, что при повышении массовой доли лигносульфоната в системе текстурные характеристики композиционных аэрогельных материалов изменяются: наблюдается рост их удельной поверхности и объема пор. При содержании в системе 6…25 % лигносульфоната натрия удельная поверхность композиционных аэрогелей равняется 250…325 м²/г, при увеличении доли лигносульфоната натрия в системе до 33…50 % – достигает 357…452 м²/г. Синтезированные материалы можно использовать в качестве сорбентов, сенсорных устройств, носителей катализаторов.

Ключевые слова: биополимер, лигносульфонат натрия, диоксид кремния, аэрогель, текстурные характеристики

Благодарности: Исследование проведено в ходе выполнения госзадания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № 122011700252-1 «Физико-химические основы селективных методов выделения, характеристики и применение биологически активных комплексов растительных объектов высоких широт для решения задач экологического контроля и здоровьесбережения» с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» (САФУ) и ЦКП КТ РФ-Арктика (ФИЦКИА УрО РАН).

Для цитирования: Бровко О.С., Нечаева М.Е., Ивахнов А.Д., Паламарчук И.А., Горшкова Н.А., Богданович Н.И. Аэрогели на основе диоксида кремния и лигносульфоната // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 184–194. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-184-194

Original article

Aerogels Based on Silicon Dioxide and Lignosulfonate

Olga S. Brovko*[1]*, *Candidate of Chemistry, Leading Research Scientist, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAF-5387-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1961-7831*
Marina E. Nechaeva*[1]✉*, *Junior Research Scientist, Postgraduate Student; ResearcherID: AAL-7068-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6099-1358*
Artem D. Ivakhnov*[1,2]*, *Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist; ResearcherID: U-4822-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2822-9192*
Irina A. Palamarchuk*[1]*, *Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist; ResearcherID: AAF-5454-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2947-1370*
Natalia A. Gorshkova*[1]*, *Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist; ResearcherID: G-2949-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2036-2418*
Nikolay I. Bogdanovich*[2]*, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: A-4662-2013, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5374-2943*
[1]N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolskiy prosp., 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; brovko-olga@rambler.ru, m.e.nechaeva@yandex.ru✉, ivahnov-tema@yandex.ru, irpalamarchuk@mail.ru, nat.gorshkova@mail.ru

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

[2]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ivahnov-tema@yandex.ru, n.bogdanovich@narfu.ru

Received on March 26, 2024 / Approved after reviewing on June 14, 2024 / Accepted on June 17, 2024

Abstract. Currently, there is considerable interest in the synthesis of aerogels based on natural polymers. The use of biopolymers is due to their physical and chemical properties, availability, non-toxicity, and the renewable nature of the raw materials needed for their production. These characteristics are possessed by lignosulfonates – sulfonates of the natural biopolymer lignin, formed as a result of sulfite (bisulfite) delignification of wood. Composite aerogel materials attract special attention by combining the properties of both organic and inorganic components. The incorporation of biopolymers into the matrix of nanocomposite aerogels can improve their consumer properties. The aim of this work has been the synthesis of aerogels based on silicon dioxide and sodium lignosulfonate, the study of gelation in the "sodium lignosulfonate – silicon dioxide" system and the assessment of the influence of synthesis conditions on the formation of the structure of aerogel materials based on them. Hydrogels based on components of various chemical natures of sodium lignosulfonate and silicon dioxide, have been obtained by sol-gel synthesis. It has been shown that strong elastic gels are formed at silicon dioxide concentrations above 175 g/l. It has been established that modification of sodium lignosulfonates with silicon dioxide leads to particle aggregation and an increase in their size. Aerogel materials based on sodium lignosulfonate and silicon dioxide, obtained at different molar ratios of componets (the mass fraction of lignosulfonate in the system), have a developed inner surface, the specific surface area is 250...452 m^2/g, the total pore volume varies from 0.84 to 2.00 cm^3/g. It has been shown that with an increase in the mass fraction of lignosulfonate in the system, the textural characteristics of synthesized composite aerogel materials change: an increase in the specific surface area and pore volume of the obtained materials is observed. With a sodium lignosulfonate content of 6…25 % in the system, the specific surface area of composite aerogels is 250…325 m^2/g; with an increase in the proportion of sodium lignosulfonate in the system to 33...50 %, it reaches 357…452 m^2/g. The synthesized materials can be used as sorbents, sensor devices, and catalyst carriers.

Keywords: biopolymer, sodium lignosulfonate, silicon dioxide, aerogel, textural characteristics

Acknowledgements: This research was carried out in the course of fulfilling the state assignment of the Federal State Budgetary Institution of Science "N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences" no. 122011700252-1 "Physicochemical Foundations of Selective Methods of Isolation, Characteristics and Application of Biologically Active Complexes of Plant Objects of High Latitudes for Solving Problems of Environmental Monitoring and Health Preservation" using the equipment of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment "Arktika" (NArFU) and Center for Collective Use of Scientific Equipment "Critical Technologies of the Russian Federation in the Field of Environmental Safety of the Arctic" (N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences).

For citation: Brovko O.S., Nechaeva M.E., Ivakhnov A.D., Palamarchuk I.A., Gorshkova N.A., Bogdanovich N.I. Aerogels Based on Silicon Dioxide and Lignosulfonate. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 184–194. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-184-194

Введение

В последнее время для синтеза новых аэрогельных материалов большинство исследователей все чаще используют биополимеры [9, 12, 23]. Причинами такого повышенного интереса к биополимерам являются их доступность и невысокая стоимость, а также уникальные физико-химические свойства, которыми они обладают [9, 10, 12, 14, 23]. Эти свойства обусловлены химической структурой биополимеров, включая разнообразие функциональных групп, благодаря чему они могут легко вступать в реакции как с органическими, так и с неорганическими соединениями [14]. К таким биополимерам относится и лигнин [19, 21, 22, 24, 27]. Природный лигнин – весьма лабильное вещество, из-за его уникальной структуры (хаотически разветвленной, сетчатой или линейной в зависимости от вида растений) и наличия химических связей с углеводами он практически нерастворим, его трудно выделить из растения в малоизмененном виде, поэтому для синтеза материалов могут быть использованы технические лигнины – лигносульфонаты, которые являются высокомолекулярными соединениями, образующимися из нативного лигнина в результате сульфитной (бисульфитной) делигнификации древесины [1, 7, 8, 21, 24]. Следует отметить, что из всех видов технических лигнинов только лигносульфонаты водорастворимы в широком диапазоне pH благодаря наличию в их структуре ионогенных сульфогрупп [3, 4, 21]. Полифункциональная природа лигносульфонатов, доступность и невысокая стоимость обусловливают перспективность их применения в качестве прекурсора для синтеза аэрогельных материалов с высоким потенциалом использования в различных областях [7, 8].

Для получения органо-неорганических аэрогелей часто используется диоксид кремния (SiO_2) [16]. Высокий спрос на кремнезем и его повсеместное применение связаны с физико-химическими свойствами данного соединения и в первую очередь способностью к активному гелеобразованию. Дополнительным преимуществом кремнезема является возможность функционализации его поверхности с целью изменения ее химических и физических свойств и расширения тем самым диапазона использования синтезируемых на его основе материалов [11].

Сочетая SiO_2 с лигносульфонатом натрия (ЛСNa), можно синтезировать новые аэрогельные материалы с уникальными дисперсионными, морфологическими и физико-химическими свойствами. Конкретные области применения получаемых материалов обусловлены их физико-химическими свойствами, которые определяются как характеристиками исходных прекурсоров, так и новыми характеристиками, приобретенными в процессе синтеза материала [14].

Несмотря на значительное количество научных публикаций, посвященных обозначенным объектам, система ЛСNa–SiO_2 рассмотрена научным сообществом весьма ограниченно [14, 18, 25]. Настоящая работа является продолжением наших исследований в области получения новых композиционных аэрогельных материалов ЛСNa–SiO_2 [7, 8], поскольку остается еще много вопросов по выяснению механизма формирования указанной системы, в частности особенностей взаимодействия компонентов при их различной концентрации для определения оптимальных параметров гелеобразования и получения материалов с определенными структурой и свойствами.

Цель работы – изучение гелеобразования в системе SiO_2–ЛСNa и оценка влияния условий синтеза на формирование структуры аэрогельных материалов на их основе.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны: ЛСNa, полученный в результате сульфитной делигнификации древесины ели на АО «Группа “Илим”» (г. Коряжма), и SiO_2 квалификации ОСЧ для люминофоров (ТУ 6-09-4947–84). Содержание основного вещества – 99,99 %.

ЛСNa был очищен от низкомолекулярных примесей методом ультрафильтрации на лабораторной установке ФМ 02-1000 с перемешиванием. Условия процесса: температура – 20±2 °С, давление в системе – 0,4 МПа, тип мембраны – полисульфоновая ПС-100 [2].

Количественное определение элементного состава ЛСNa проводили на элементном анализаторе EvroEA 3000 (конфигурация [CNHS]). Процедура заключалась в высокотемпературном сжигании образца в присутствии кислорода с последующим газохроматографическим разделением и детектированием продуктов сгорания при помощи катарометрического детектора (температура печи – 980 °С, детектора – 110 °С).

Определение функциональных групп ЛСNa осуществляли по общепринятым методикам [26]: фенольные гидроксильные группы устанавливали спектрофотометрическим Δε-методом, карбонильные группы – методом оксимирования, кислые и карбоксильные группы – хемосорбционным методом, метоксильные группы – методом Цейзеля–Фибека–Шваппаха, сульфогруппы – титриметрическим методом. Характеристика ЛСNa (% к абсолютно сухой массе):

С±Δ	46,6±2,3
Н±Δ	5,07±0,1
S±Δ	6,2±0,08
Na±Δ	4,5±0,1
О	37,6
SO_3H	13,4
СНО	1,45
$OH_ф$	2,5
OCH_3±Δ	10,5±0,4

На основании данных элементного и функционального анализа ЛСNa рассчитана его полуэмпирическая формула – $C_9H_{10,26}O_{5,83}(OCH_3)_{0,86}S_{0,41}$, таким образом, условный моль фенилпропановой единицы ЛСNa составил 251 атомную единицу массы.

Синтез аэрогелей проводили в 3 этапа. На 1-м этапе получали гидрогели в результате смешения коллоидного раствора ЛСNa и щелочного золя кремнезема при различных мольных соотношениях компонентов с последующим снижением pH системы с 11,3…11,5 до 7,5…8,0 добавлением концентрированной серной кислоты. Гель созревал в течение 24 ч. Затем путем замены водной фазы в структуре гидрогелей на органическую (ацетон квалификации ЧДА, 99,5 %) были произведены лиогели. Замену растворителя осуществляли с пошаговым увеличением концентрации ацетона от 10 до 100 % в течение суток.

На заключительном этапе получали аэрогели высушиванием лиогелей в токе CO_2, находящегося в сверхкритических условиях (СК-сушка) при температуре 40 °C, давлении 10 МПа и скорости потока 1 мл CO_2/мин (для состояния CO_2 – 10 МПа и 2 °C) с использованием установки MV-10ASFE (Waters, США).

Мольное соотношение компонентов в реакционной смеси рассчитывали по формуле

$$Z = \frac{C_{SiO_2}}{C_{ЛСNa}},$$

где C – мольные концентрации компонентов в смеси.

Распределение частиц по размерам в исследуемых растворах и смесях проводили методом динамического рассеяния света на приборе Nanopartica SZ-100S2 (Horiba, Япония).

Параметры пористой структуры синтезированных материалов на основе ЛСNa и SiO_2 получены методом низкотемпературной адсорбции азота (77,4 К) на анализаторе удельной поверхности ASAP 2020 MP (Micromeritics, США). Обработку полученных изотерм осуществляли с использованием различных расчетных методов: расчет удельной поверхности – по методу Брунауэра–Эммета–Теллера; определение площади поверхности микропористого материала и оценку объема микропор в присутствии мезопор – t-plot методом, оценку распределения микро- и мезопор по размерам – методом Horvath–Kawazoe.

Результаты исследования и их обсуждение

При получении новых аэрогельных материалов в качестве 1-й стадии перспективным представляется применение простого и удобного способа – золь-гель синтеза, позволяющего, варьируя условия процесса, получать материалы с заданными физико-химическими и потребительскими свойствами [5, 13, 17, 20].

Концентрации и соотношения прекурсоров в ходе синтеза оказывают значительное влияние на гелеобразование. Процесс гелеобразования («старения» геля) является заключительным этапом золь-гель синтеза, оказывающим существенное влияние на структуру, пористость, площадь поверхности, размер пор и объемную усадку получаемого аэрогельного материала [6, 17]. В ходе процесса старения происходит постепенное повышение прочности структуры геля и его упругости вследствие увеличения числа контактов между частицами. При этом стягивается структурная сетка геля, в результате чего он сжимается, его объем уменьшается и выделяется избыточный объем дисперсионной среды [15]. Возможность формирования прочных упругих гелей в исследуемой системе определяется концентрацией (содержанием) основного гелеобразующего компонента – SiO_2, т. к. характерной особенностью золя кремнезема является его способность к гелеобразованию и переходу от свободнодисперсной системы (золь) к связнодисперсной (гель).

Прочность и упругость геля в системе ЛСNa–SiO_2 могут быть количественно оценены по объему отделяющейся в результате синерезиса жидкости. Количество (объем) выделяемой жидкости определяет глубину синерезиса.

На рис. 1 приведены объемы синерезисной жидкости для гелей ЛСNa–SiO_2, полученных на основе ЛСNa с концентрацией 10…60 г/л и SiO_2 с концентрациями 150, 175 и 200 г/л. Внешний вид гелей на основе ЛСNa с концентрацией 40 г/л и SiO_2 с концентрацией 100…200 г/л представлен на рис. 2.

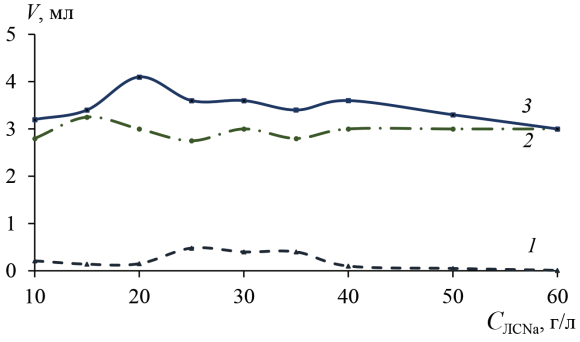


Рис. 1. Объем выделившейся жидкости (*V*) при синерезисе геля на основе ЛСNa (10…60 г/л) и SiO_2 с концентрациями, г/л: *1* – 150; *2* – 175; *3* – 200

Fig. 1. The volume of the released liquid (*V*) during syneresis of a gel based on LSNa (10...60 g/l) and SiO_2 with concentrations, g/l: *1* – 150; *2* – 175; *3* – 200

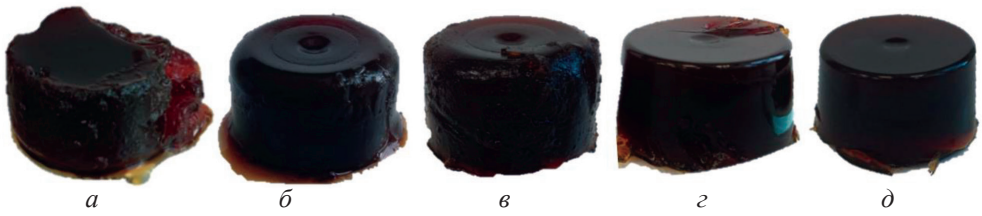


Рис. 2. Фотографии гелей на основе ЛСNa (40 г/л) и SiO_2 с различными концентрациями, г/л: *а* – 100; *б* – 125; *в* – 150; *г* – 175; *д* – 200

Fig. 2. The photos of gels based on LSNa (40 g/l) and SiO_2 with different concentrations, g/l: *а* – 100; *б* – 125; *в* – 150; *г* – 175; *д* – 200

В результате проведенного исследования установлено, что гели на основе ЛСNa с его концентрацией 10…60 г/л и SiO_2 с концентрациями 100, 125, 150 г/л формируются хрупкими, в них слабо протекает синерезис, объем выделившейся жидкости не превышает 0,5 мл (рис. 1 и 2, *а–в*). Однако при увеличении концентрации SiO_2 до 175 и 200 г/л получаемые гели характеризуются как плотные, однородные, наблюдается активный синерезис, выделяется жидкость в объеме 2,8…4,1 мл (рис. 1 и 2, *г*, *д*). Прочность геля растет за счет агрегации частиц, срастания и уплотнения структуры. Таким образом, плотные гели в системе ЛСNa–SiO_2 формируются при концентрации SiO_2 свыше 175 г/л.

Оценка гидродинамического размера частиц в исходных растворах ЛСNa и SiO_2 и смеси на их основе выполнена методом динамического светорассеяния. На рис. 3 представлены гистограммы распределения частиц по размерам в растворах SiO_2, ЛСNa, а также реакционной смеси ЛСNa–SiO_2.

Кривая распределения частиц по размерам в растворе золя SiO_2 (рис. 3, *а*) унимодальна, диаметр частиц составляет 5…45 нм. Распределение частиц по размерам в коллоидных растворах лигносульфонатов бимодально (рис. 3, *б*): наблюдается 2 пика с частицами до 1 нм (собственно макромолекулы лигносульфоната) и 6…171 нм (ассоциаты макромолекул лигносульфоната), при этом обе фракции полидисперсны. Модификация ЛСNa SiO_2 (рис. 3, *в*) приводит к агрегации частиц и увеличению их размера. Диаграмма распределения частиц по размерам в смеси ЛСNa–SiO_2 имеет 2 основных пика, при этом 1-й пик с ча-

стицами до 4 нм, 2-й – 11…193 нм. Проявляется также слабо выраженный 3-й пик с частицами около 6 мкм. Полученные результаты указывают на формирование совместных ассоциатов в смесях ЛСNa–SiO_2.

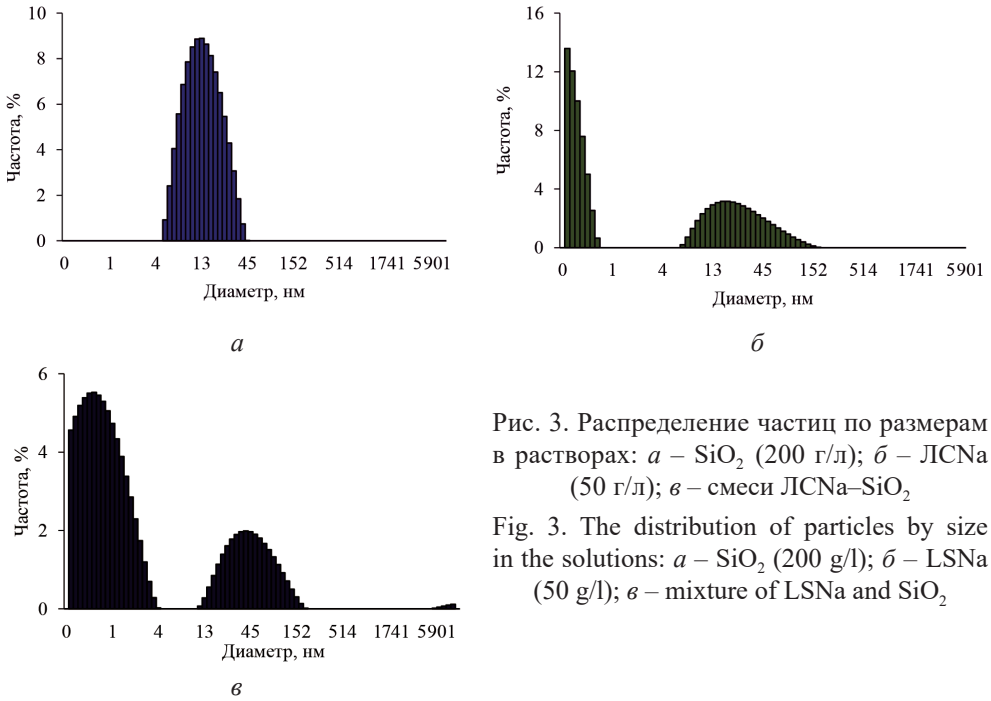


Рис. 3. Распределение частиц по размерам в растворах: *а* – SiO_2 (200 г/л); *б* – ЛСNa (50 г/л); *в* – смеси ЛСNa–SiO_2

Fig. 3. The distribution of particles by size in the solutions: *а* – SiO_2 (200 g/l); *б* – LSNa (50 g/l); *в* – mixture of LSNa and SiO_2

Синтезированы аэрогельные материалы на основе ЛСNa и SiO_2 при различных мольных соотношениях компонентов – *Z* (моль/моль), а также исходной концентрации ЛСNa и его массовой доли в системе и оценены их текстурные характеристики (см. таблицу).

Текстурные характеристики аэрогелей на основе лигносульфоната натрия и кремнезема

The textural characteristics of aerogels based on sodium lignosulfonate and silica

Z, моль/моль	ЛСNa, г/л (массовая доля ЛСNa, %)	Удельная поверхность, $м^2/г$		Объем пор, $см^3/г$			Средняя ширина пор, нм
		общая	мезо- и макропор	общий	микропор	мезопор	
Аэрогель ЛСNa–SiO_2							
2,0	50 (50)	452±12	387±10	2,00±0,10	0,018±0,001	1,50±0,08	17,7±0,9
3,0	50 (33)	357±9	278±7	1,75±0,09	0,037±0,002	1,23±0,06	19,6±1,0
4,0	40, 50 (25)	284±7	232±6	1,41±0,07	0,033±0,002	1,09±0,06	19,9±1,0
5,2	30 (20)	250±7	202±5	0,84±0,02	0,07±0,002	0,62±0,02	12,9 ±0,4
7,8	20 (13)	325±8	271±7	1,30±0,03	0,120±0,003	1,20±0,03	18,7±0,5
15,6	10 (6)	300±9	240±7	1,30±0,04	0,110±0,004	1,20±0,04	16,4±0,5
Аэрогель на основе SiO_2							
–	0 (0)	246±6	117±3	0,85±0,04	0,005±0,001	0,56±0,03	13,8±0,7

Примечание: В таблице приведены средние значения ± доверительные границы погрешности.

Показано, что при увеличении массовой доли ЛСNa в системе ЛСNa–SiO_2 и уменьшении Z текстурные характеристики аэрогельных материалов изменяются: в целом наблюдается рост удельной поверхности и объема пор. Текстурные характеристики аэрогелей ЛСNa–SiO_2 в сравнении с аэрогелем на основе SiO_2 улучшаются: удельная поверхность повышается в 1,2–1,8 раза, а объем пор – в 1,7–2,4 раза. Можно констатировать, что при содержании ЛСNa в системе 6…25 % удельная поверхность аэрогельных материалов составляет 250…325 м^2/г, а объем пор – 0,84…1,41 см^3/г. При большей доле ЛСNa в системе (33…50 %) удельная поверхность аэрогелей достигает 357…452 м^2/г, а объем пор – 1,75…2,00 см^3/г. При этом все синтезированные аэрогели ЛСNa–SiO_2 являются мезопористыми материалами; объем мезопор от общего объема пор составляет 70…92 %. Наилучшими текстурными характеристиками обладает аэрогель, полученный при Z = 2, удельная поверхность которого равняется 452±12 м^2/г. Основной вклад в площадь удельной поверхности аэрогеля также вносят мезопоры, объем которых составляет 75 % от общего объема пор, средняя ширина пор – 17,7±0,9 нм.

Заключение

Изучено гелеобразование в системе «лигносульфонат натрия – диоксид кремния» и показано, что прочные гели образуются при использовании диоксида кремния с концентрацией более 175 г/л. Установлено, что в смесях «лигносульфонат натрия – диоксид кремния» образуются совместные ассоциаты, размеры частиц которых составляют: 0,3…4 нм, 11…193 нм и около 6 мкм.

Синтезированы аэрогельные материалы на основе лигносульфоната натрия и диоксида кремния. Полученные композиционные аэрогельные материалы обладают развитой мезопористой структурой. Площадь удельной поверхности аэрогелей в зависимости от доли лигносульфоната натрия в системе составляет 250…452 м^2/г, общий объем пор варьирует от 0,8 до 2,0 см^3/г, при этом 70…92 % от общего объема пор составляют мезопоры. В системе «лигносульфонат натрия – диоксид кремния» последний является основным гелеобразователем, тогда как лигносульфонат выполняет роль структурообразователя при синтезе пористых материалов. Синтез мезопористых материалов представляет значительный интерес: их пористые структуры создают основу для получения сорбентов, носителей катализаторов и сенсорных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Арапова О.В., Чистяков А.В., Цодиков М.В., Моисеев И.И.* Лигнин – возобновляемый ресурс углеводородных продуктов и энергоносителей (обзор) // Нефтехимия. 2020. Т. 60, № 3. С. 251–269.

Arapova O.V., Chistyakov A.V., Tsodikov M.V., Moiseev I.I. Lignin – a Renewable Resource of Hydrocarbon Products and Energy Carriers (Review). *Neftekhimiya* = Petroleum Chemistry, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 251–269. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0028242120030041

2. *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 Purifcation, Concentration and Fractionation of Lignosulphonates of Sulfite Liquor. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia, 2009, no. 8, pp. 37–39. (In Russ.).

3. *Паламарчук И.А., Бровко О.С., Бойцова Т.А., Вишнякова А.П., Макаревич Н.А.* Влияние ионной силы раствора на комлексообразование сульфопроизводных биополимера лигнина и хитозана // Химия растит. сырья. 2011. № 2. С. 57–64.

Palamarchuk I.A., Brovko O.S., Bojtsova T.A., Vishnyakova A.P., Makarevich N.A. The Ionic Strength Effect of a Solution on the Complex Formation of Sulfonated Biopolymers of Lignin and Chitosan. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2011, no. 2, pp. 57–64. (In Russ.).

4. *Плахин В.А., Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А.* Синтез коллоидного серебра с использованием лигносульфонатов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 184–195.

Plakhin V.A., Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A. Synthesis of Colloidal Silver Using Lignosulfonates. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 6, pp. 184–195. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-184-195

5. *Шиндряев А.В., Лебедев А.Е., Меньшутина Н.В.* Получение аэрогелей диоксида кремния с модификацией внутренней поверхности // Вестн. ТГТУ. 2023. Т. 29, № 3. С. 463–473.

Shindryaev A.V., Lebedev A.E., Menshutina N.V. Preparing Silicon Dioxide Aerogels with Modification of the Inner Surface. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Transactions of the Tambov State Technical University, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 463–473. (In Russ.).

6. Babiarczuk B., Lewandowski D., Kierzek K., Detyna J., Jones W., Kaleta J., Krzak J. Mechanical Properties of Silica Aerogels Controlled by Synthesis Parameters. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, vol. 606, art. no. 122171. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122171

7. Brovko O., Palamarchuk I., Bogdanovich N., Ivakhnov A., Chukhchin D., Belousova M., Arkhilin M., Gorshkova N. Composite Aerogel Materials Based on Lignosulfonates and Silica: Synthesis, Structure, Properties. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, vol. 269, art. no. 124768. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124768

8. Brovko O.S., Bogolitsyn K.G., Palamarchuk I.A., Gorshkova N.A., Bogdanovich N.I., Ivakhnov A.D., Belousova M.E. Preparation of Aerogel Composite Materials Based on Lignosulfonates and Silica. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2022, vol. 16, pp. 1204–1207. https://doi.org/10.1134/S1990793122070041

9. Budtova T., Aguilera D.A., Beluns S., Berglund L., Chartier C., Espinosa E., Gaidukovs S., Klimek-Kopyra A., Kmita A., Lachowicz D., Liebner F., Platnieks O., Rodríguez A., Navarro L.K.T., Zou F., Buwalda S.J. Biorefinery Approach for Aerogels. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 12, art. no. 2779. https://doi.org/10.3390/polym12122779

10. Christina K., Subbiah K., Arulraj P., Krishnan S.K., Sathishkumar P. A Sustainable and Eco-Friendly Approach for Environmental and Energy Management Using Biopolymers Chitosan, Lignin and Cellulose – A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 257, part 2, art. no. 128550. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128550

11. Jesionowski T., Klapiszewski Ł., Milczarek G. Kraft Lignin and Silica as Precursors of Advanced Composite Materials and Electroactive Blends. *Journal of Materials Science*, 2014, vol. 49, pp. 1376–1385. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7822-7

12. Khalil H.P.S.A., Yahya E.B., Jummaat F., Adnan A.S., Olaiya N.G., Rizal S., Abdullah C.K., Pasquini D., Thomas S. Biopolymers Based Aerogels: A Review on Revolutionary Solutions for Smart Therapeutics Delivery. *Progress in Materials Science*, 2023, vol. 131, art. no. 101014. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101014

13. Khan N.R., Sharmin T., Rashid A.B. Exploring the Versatility of Aerogels: Broad Applications in Biomedical Engineering, Astronautics, Energy Storage, Biosensing, and Current Progress. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 1, art. no. e23102. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23102

14. Klapiszewski L., Zietek J., Ciesielczyk F., Siwinska-Stefanska K., Jesionowski T. Magnesium Silicate Conjugated with Calcium Lignosulfonate: *In situ* Synthesis and Comprehensive Physicochemical Evaluations. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2018, vol. 54(3), pp. 793–802. https://doi.org/10.5277/ppmp1875

15. Matinfar M., Nychka J.A. A review of Sodium Silicate Solutions: Structure, Gelation, and Syneresis. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2023, vol. 322, art. no. 103036. https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103036

16. Meti P., Mahadik D.B., Lee K.-Y., Wang Q., Kanamori K., Gong Y.-D., Park H.-H. Overview of Organic–Inorganic Hybrid Silica Aerogels: Progress and Perspectives. *Materials & Design*, 2022, vol. 222, art. no. 111091. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111091

17. Minju N., Balagopal N.N., Savithri S. Sodium Silicate-Derived Aerogels: Effect of Processing Parameters on Their Applications. *RSC Advances*, 2021, vol. 11, pp. 15301–15322. https://doi.org/10.1039/D0RA09793D

18. Modrzejewska-Sikorska A., Konował E., Klapiszewski Ł., Nowaczyk G., Jurga S., Jesionowski T., Milczarek G. Lignosulfonate-Stabilized Selenium Nanoparticles and Their Deposition on Spherical Silica. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, vol. 103, pp. 403–408. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.083

19. Patel R., Dhar P., Babaei-Ghazvini A., Dafchahi M.N., Acharya B. Transforming Lignin into Renewable Fuels, Chemicals, and Materials: A Review. *Bioresource Technology Reports*, 2023, vol. 22, art. no. 101463. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101463

20. Rafieian F., Dufresne A., Askari G., Rezaei A., Seyedhosseini-Ghaheh H., Jafari S.M. Aerogels as Novel Ingredients: Production, Properties and Applications in Medical, Food and Environmental Sectors. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, vol. 687, art. no. 133410. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133410

21. Ruwoldt J. A Critical Review of the Physicochemical Properties of Lignosulfonates: Chemical Structure and Behavior in Aqueous Solution, at Surfaces and Interfaces. *Surfaces*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 622–648. https://doi.org/10.3390/surfaces3040042

22. Schneider W.D.H., Dillon A.J.P., Camassola M. Lignin Nanoparticles Enter the Scene: A Promising Versatile Green Tool for Multiple Applications. *Biotechnology Advances*, 2021, vol. 47, art. no. 107685. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107685

23. Soorbaghi F.P., Isanejad M., Salatin S., Ghorbani M., Jafari S., Derakhshankhah H. Bioaerogels: Synthesis Approaches, Cellular Uptake, and the Biomedical Applications. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2019, vol. 111, pp. 964–975. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.01.014

24. Vera M., Bischof S., Rivas B.L., Weber H., Mahler A.K., Kozich M., Guebitz G.M., Nyanhongo G.S. Biosynthesis of Highly Flexible Lignosulfonate–Starch Based Materials. *European Polymer Journal*, 2023, vol. 198, art. no. 112392. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112392

25. Xiong W., Yang D., Alam M.A., Xu J., Li Y., Wang H., Qiu X. Structural Regulation of Lignin/Silica Nanocomposites by Altering the Content of Quaternary Ammonium Groups Grafted into Softwood Kraft Lignin. *Industrial Crops and Products*, 2020, vol. 144, art. no. 112039. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112039

26. Zakis G.F. *Functional Analysis of Lignins and Their Derivatives*. Riga, Zinatne, 1987. 230 p.

27. Zhang Z., Chen Y., Wang D., Yu D., Wu C. Lignin-Based Adsorbents for Heavy Metals. *Industrial Crops & Products*, 2023, vol. 193, art. no. 116119. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116119

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

---

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 676.017
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-195-205

Стабилизация проклейки макулатурного тарного картона в процессе хранения

В.В. Гораздова*✉, *канд. техн. наук; *ResearcherID: GWC-4729-2022,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4732-7791
Е.В. Дернова, канд. техн. наук; *ResearcherID: HKE-0047-2023,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7869-9646
Д.А. Дулькин, д-р техн. наук; *ResearcherID: HKD-9977-2023,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6517-2979
ООО «Управляющая компания “Объединенные бумажные фабрики”», Киевское шоссе, 22-й км, пос. Московский, д. 4, стр. 1, блок Б, Москва, Россия, 108811; vgorazdova@ukobf.com✉, edernova@ukobf.com, ddulkin@ukobf.com

Поступила в редакцию 06.05.24 / Одобрена после рецензирования 01.08.24 / Принята к печати 03.08.24

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию механизма проклейки тарного картона. Как показывает практика, клей АКД (дисперсия алкилкетендимера) на бумагоделательной машине созревает не полностью и окончательная проклейка в бумаге и картоне на накате не достигается. Скорость взаимодействия клея АКД с гидроксильными группами целлюлозы и воды невысока: в зависимости от температуры хранения бумаги процесс может занимать от нескольких часов до нескольких суток. Как правило, через 2 недели производитель имеет окончательный результат проклейки в материале, но чаще готовая продукция не задерживается на складах длительное время, а отправляется к потребителю сразу после изготовления. Для того чтобы прогнозировать ожидаемый уровень гидрофобных свойств тарного картона после полного созревания клея АКД, был использован экспресс-метод определения впитываемости при одностороннем смачивании по Коббу. Данный метод предполагает термическую обработку при температуре 105±2 °С, после чего реакция взаимодействия воска АКД с компонентами бумаги завершается и впитываемость бумаги больше не снижается. Однако в реальных условиях хранения бумаги и картона результаты, полученные экспресс-методом, не всегда соответствуют фактической впитываемости. Это связано с тем, что в реальности бумага и картон созревают иначе, чем при термической обработке. При этом на практике иногда встречаются следующие проблемы с впитываемостью у конечного потребителя: недозревание и перезревание клея АКД, а также реверсия проклейки. Поэтому производителю важно оценить, каким образом происходит созревание клея АКД и как можно оптимизировать и стабилизировать этот процесс при хранении. Проведенное научное исследование направлено на прогнозирование и регулирование совокупности рассматриваемых свойств тарного картона и самой тары, которых они достигнут после отгрузки потребителю вследствие длительного процесса созревания клея, применяемого для проклейки, зависящего от выбора химических вспомогательных веществ и вариантов их дозирования. Обоснована возможность использования экспресс-метода определения поверхностной односторонней впитываемости для прогноза ряда нормируемых физико-механических показателей будущей тары.

Ключевые слова: макулатура, тарный картон, проклейка, клей АКД, химические вспомогательные вещества

© Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Для цитирования: Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А. Стабилизация проклейки макулатурного тарного картона в процессе хранения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 195–205. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-195-205

Original article

Stabilization of Sizing of Waste Paper Containerboard during Storage

Victoria V. Gorazdova✉***,*** *Candidate of Engineering; ResearcherID: GWC-4729-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4732-7791*
Elena V. Dernova, *Candidate of Engineering; ResearcherID: HKE-0047-2023, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7869-9646*
Dmitriy A. Dulkin, *Doctor of Engineering; ResearcherID: HKD-9977-2023, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6517-2979*
Consolidated Paper Mills Management Company, LLC, 22nd km of the Kievskoe sh., Moskovsky Settlement, household 4, bldg. 1, block B, Moscow, 108811, Russian Federation; vgorazdova@ukobf.com✉, edernova@ukobf.com, ddulkin@ukobf.com

Received on May 6, 2024 / Approved after reviewing on August 1, 2024 / Accepted on August 3, 2024

Abstract. This article is devoted to the study of the mechanism of containerboard sizing. As practice shows, AKD glue (alkyl ketenedimer dispersion) does not fully mature on a paper-making machine and the final sizing in paper and cardboard on the reel is not achieved. The rate of interaction of AKD glue with the hydroxyl groups of cellulose and water is low and, depending on the paper storage temperature, the process can take from several hours to several days. As a rule, after 2 weeks the manufacturer has the final result of sizing in the material, but more often the finished products do not remain in warehouses for a long time, but are sent to the consumer immediately after manufacture. In order to predict the expected level of hydrophobic properties of containerboard after the complete maturation of AKD glue, an express method has been used to determine the absorbency with one-sided wetting according to the Cobb method. This method involves heat treatment at a temperature of 105 ± 2 °C, after which the reaction of the AKD wax with the paper components is completed, and the absorbency of the paper no longer decreases. However, in real conditions of paper and cardboard storage, unfortunately, the results obtained by the express method do not always correspond to the actual absorbency. This is due to the fact that in reality paper and cardboard mature differently than during heat treatment. At the same time, in practice, the following problems with the absorbency are sometimes encountered by the end consumer: under- and over-maturation of AKD glue, as well as reversal of sizing. Therefore, it is important for the manufacturer to evaluate how the maturation of AKD glue occurs and how this process can be optimized and stabilized during storage. The conducted scientific research is aimed at predicting and regulation of the set of considered properties of containerboard and the container itself, which they will achieve after shipment to the consumer due to the long maturation process of the glue used for sizing, depending on the choice of chemical auxiliaries and their dosing options. The possibility of using an express method for determining the surface one-sided absorbency to predict a number of normalized physical and mechanical parameters of future containers is substantiated.
Keywords: waste paper, containerboard, sizing, AKD glue, chemical auxiliaries

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

For citation: Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dulkin D.A. Stabilization of Sizing of Waste Paper Containerboard during Storage. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 195–205. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-195-205

Введение

В широком смысле под упаковочными материалами подразумевают бумажные коробки или коробки из гофрированного картона. Особенно важную роль в логистике и складировании при хранении играют гофроящики. Они отвечают за загрузку, защиту и эстетику помещаемого в них товара. Благодаря доступности, небольшой массе, относительно хорошей структурной прочности, низкой стоимости и возможности вторичной переработки гофроящики пользуются большой популярностью и широко используются во всем мире.

Известно, что материал гофрированных коробок изготовлен из бумаги, что обусловливает некоторые недостатки данной продукции. Помимо неспособности сопротивляться прокалыванию острыми предметами, есть еще один недостаток, заключающийся в плохой влагостойкости. В сезон дождей, если поместить обычный необработанный гофрокартон во влажную среду, через несколько дней можно обнаружить, что материал стал мягким и деформировался с потерей внешнего вида и грузоподъемности [9, 15, 20]. Чтобы упаковка могла противостоять возможной влажной среде во время хранения и транспортирования, на этапе производства такой продукции необходимо использовать материалы с низким водопоглощением. В противном случае продукция тарного картона не сможет выполнить свои функции, что приведет к экономическим потерям для потребителей [10–14].

Кроме того, способность тарного картона к водопоглощению оказывает большое влияние на его пригодность для нанесения печати. Известно, что низкое или полное отсутствие впитывающих свойств будет вызывать стекание краски с поверхности бумаги и, напротив, при неограниченном впитывании краска может проходить на обратную сторону бумаги [2, 3, 18, 19, 21]. Таким образом, как высокая, так и низкая впитывающая способность делают бумагу непригодной для печати.

Для придания бумаге необходимого уровня гидрофобности в технологический цикл производства включают проклейку в массе. Под проклейкой понимают способность бумаги сопротивляться смачиванию разнообразными жидкостями (водой, чернилами, кислотами, щелочами, молоком, маслом и др.), отличающимися по физико-химическим характеристикам и химическим свойствам, впитывать их [1]. Основная задача проклейки заключается в снижении впитывающей способности, обусловленной капиллярным строением волокна бумаги и гидрофильным характером волокнистой массы, с учетом требований, предъявляемых к качеству конечного продукта [5, 7, 17]. Показателем достигнутого уровня снижения впитывающей способности бумаги является степень проклейки, которая устанавливается с помощью различных методов испытаний и выражается соответствующими величинами. Процесс проклейки призван обеспечивать для каждого конкретного вида бумаги и картона определенную впитывающую способность, оцениваемую заранее на этапе исследований и разработок или до формаль-

ного массового производства. Так появился экспресс-метод Кобба, его результаты считаются относительно точными.

Метод Кобба – это испытание, которое определяет массу воды, поглощенной поверхностью бумаги, картона или гофрированного картона за определенный период времени. Его цель – оценить водопоглощающую способность материала. Чем меньше значение Кобба, тем меньше испытуемый материал впитывает воду – см. [6, 8, 16], а также ИТС 1–2015 «Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона». Применение метода Кобба имеет большое положительное значение при выборе упаковочных материалов и проверке соответствия готовой картонной тары требованиям влагостойкости.

Целью настоящего исследования является стабилизация технологических и эксплуатационных свойств тарного картона в процессе хранения посредством регулирования поверхностной односторонней впитываемости и эффективности системы удержания мелкого волокна в результате проклейки.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали пробы бумажной массы и модельные образцы готовой продукции флютинга и картона-лайнера.

Концентрацию макулатурной волокнистой суспензии оценивали в соответствии с ГОСТ Р 50068–92 (ИСО 4119–78) «Полуфабрикаты волокнистые. Ускоренный метод определения концентрации массы».

Степень помола массы определяли на аппарате Шоппер–Риглера в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 «Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям».

Электрокинетические свойства бумажной массы устанавливали по методикам производителя Mütek. Вследствие выраженного гетерогенного характера среды электрокинетические свойства бумажной массы зачастую нельзя выразить только одним параметром, поэтому используют несколько характеристик. Наиболее распространенными являются электрокинетический потенциал (ζ-потенциал), образующийся при контакте растительных волокон с полярными жидкостями, а также катионная потребность (КП) как мера присутствия интерферирующих веществ в волокнистом полуфабрикате [4].

Для оценки гидрофобных свойств определяли поверхностную впитываемость воды при одностороннем смачивании по методу Кобба в соответствии с ГОСТ 12605–97 (ИСО 535–91) «Бумага и картон. Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)». Установление впитываемости при одностороннем смачивании флютинга проводили по методу $Кобб_{30}$, картона-лайнера – $Кобб_{60}$. Контроль осуществляли в день изготовления лабораторных образцов, спустя 3, 7, 10 и 14 дней.

Качество лабораторных образцов флютинга и картона-лайнера оценивали по следующим физико-механическим показателям: сопротивлению сжатию на коротком расстоянии – в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9895–2013 «Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком

расстоянии между зажимами»; сопротивлению плоскостному сжатию гофрированного образца – в соответствии с ГОСТ Р ИСО 3035–2013 «Картон гофрированный. Метод определения сопротивления плоскостному сжатию»; прочности при растяжении – в соответствии с ГОСТ ИСО 1924-1–96 «Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Часть 1. Метод нагружения с постоянной скоростью»; сопротивлению продавливанию – в соответствии с ГОСТ Р ИСО 2759–2017 «Картон. Метод определения сопротивления продавливанию».

Результаты исследования и их обсуждение

На 1-м этапе эксперимента установили влияние точки подачи клея АКД (дисперсия алкилкетендимера) на степень проклейки тарного картона и ее стабильность в процессе хранения. Для этого рассматривали 3 варианта дозирования химических вспомогательных веществ (ХВВ): 1) клей АКД – крахмал; 2) крахмал – клей АКД; 3) крахмал – клей АКД – крахмал (табл. 1).

Таблица 1

Показатели качества бумажной массы после проклейки в зависимости от варианта дозирования ХВВ

The quality indicators of paper pulp after sizing depending on the dosing option of chemical auxiliaries

Вариант дозирования ХВВ	ζ-потенциал, мВ	КП, мг-экв./л
Без химикатов	–7,5	260
Бумажная масса для изготовления флютинга		
1	–5,8	160
2	–4,6	140
3	–5,6	120
Бумажная масса для изготовления картона-лайнера		
1	–5,3	140
2	–4,4	140
3	–5,7	90

Содержание ХВВ в композиции картона-лайнера выше, чем в композиции флютинга.

Снижение катионной потребности при использовании химических добавок в композиции макулатурной массы объясняется нейтрализацией части анионных загрязнений, присутствующих в массе, катионным крахмалом.

Рекомендуемый диапазон ζ-потенциала макулатурной массы находится в пределах –6,0…–9,0 мВ. Из данных табл. 1 видно, что 2-й вариант не соответствует рекомендуемому диапазону.

Для оценки гидрофобных свойств тарного картона (рис. 1) были изготовлены лабораторные образцы с массой 1 м^2 125 г. Степень помола составила 35 °ШР. Экспресс-метод определения впитываемости заключается в выдерживании образцов в сушильном шкафу в течение 10 мин при температуре 105±2 °С с целью созревания клея АКД, а затем помещении образцов в эксикатор.

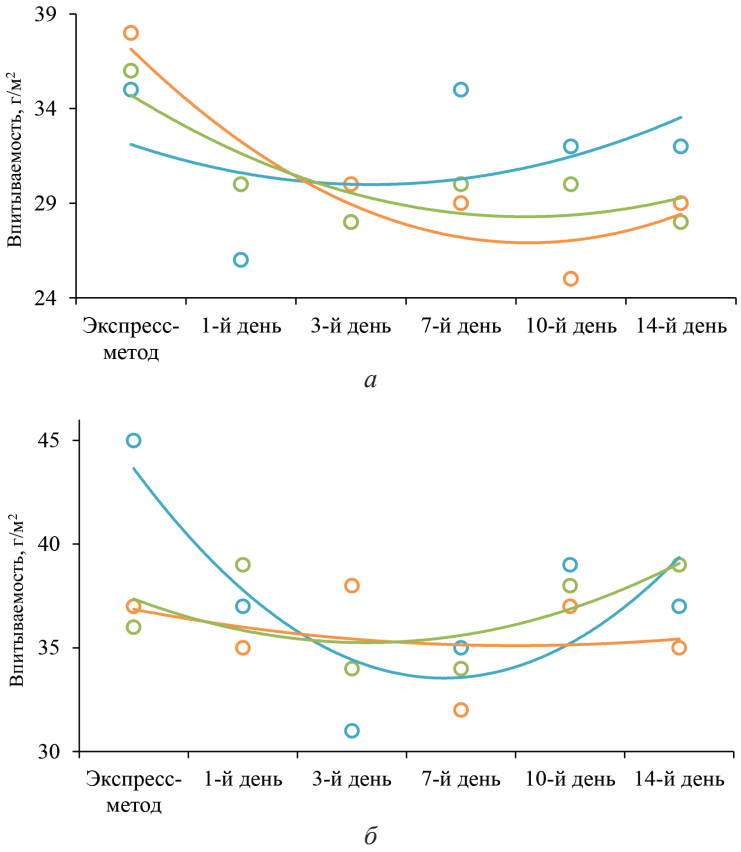


Рис. 1. Впитываемость при одностороннем смачивании образцов флютинга (*а*) и картона-лайнера (*б*) в процессе хранения в зависимости от варианта дозирования ХВВ: – 1; – 2; – 3

Fig. 1. The absorbency during one-sided wetting of fluting (*a*) and linerboard (*б*) samples during storage depending on the dosing option of chemical auxiliaries: – 1; – 2; – 3

Показано, что по всем вариантам дозирования ХВВ существенного изменения характеристик проклеенных образцов флютинга и картона-лайнера в течение 14 дней не произошло – отклонения в пределах 0…14 г/м². В связи с этим рассмотрим показатели с точки зрения стабильности проклейки. В табл. 2 представлены коэффициенты вариации по всем испытаниям. Для получения коэффициента вариации были взяты средние показатели впитываемости по каждому периоду испытаний (до 14 дней с момента изготовления).

Наиболее стабильную проклейку тарного картона дает 3-й вариант дозирования ХВВ, в котором предусмотрена 2-ступенчатая схема подача крахмала – по-видимому, 2-я часть крахмала играет роль стабилизатора проклейки.

На 2-м этапе эксперимента установили влияние системы удержания мелкого волокна на степень проклейки тарного картона и ее стабильность в процессе хранения (табл. 3). Для этого рассматривали 2 образца бумажной

массы: холостой (без использования ХВВ для удержания мелкого волокна); с удерживающими агентами (с использованием фиксирующего агента и флокулянта). При дозировании традиционных ХВВ для тарного картона использовали 2-ступенчатую схему подачи (3-й вариант), которая была определена как наиболее эффективная в ходе 1-го этапа эксперимента.

Таблица 2

Коэффициент вариации средней впитываемости образцов флютинга и картона-лайнера в зависимости от варианта дозирования ХВВ, %

The coefficient of variation of the average absorbency of fluting and linerboard samples depending on the dosing option of chemical auxiliaries, %

Вариант дозирования ХВВ	Флютинг	Картон-лайнер
1	5,6	7,0
2	6,2	7,7
3	3,9	6,3

Таблица 3

Показатели качества бумажной массы с использованием и без использования ХВВ

The quality indicators of paper pulp with and without the use of chemical auxiliaries

Образец	ζ-потенциал, мВ	КП, мг-экв./л	Коэффициент удержания, %
Без химикатов	–9,5	220	90
Бумажная масса для изготовления флютинга			
Холостой	–6,5	210	93
С удерживающими агентами	–7,1	170	97
Бумажная масса для изготовления картона-лайнера			
Холостой	–5,8	200	94
С удерживающими агентами	–6,6	160	96

За счет содержания в регистровой воде остаточных химикатов катионная потребность макулатурной массы снизилась на 20 %, а удержание волокна осталось практически без изменений. После введения удерживающих агентов катионная потребность уменьшилась на 23…25 %, удержание волокна повысилось в среднем на 7 %.

Динамика созревания клея АКД для лабораторных образцов флютинга и картона-лайнера представлена на рис. 2.

В табл. 4 сведены данные коэффициентов вариации средних значений впитываемости при одностороннем смачивании.

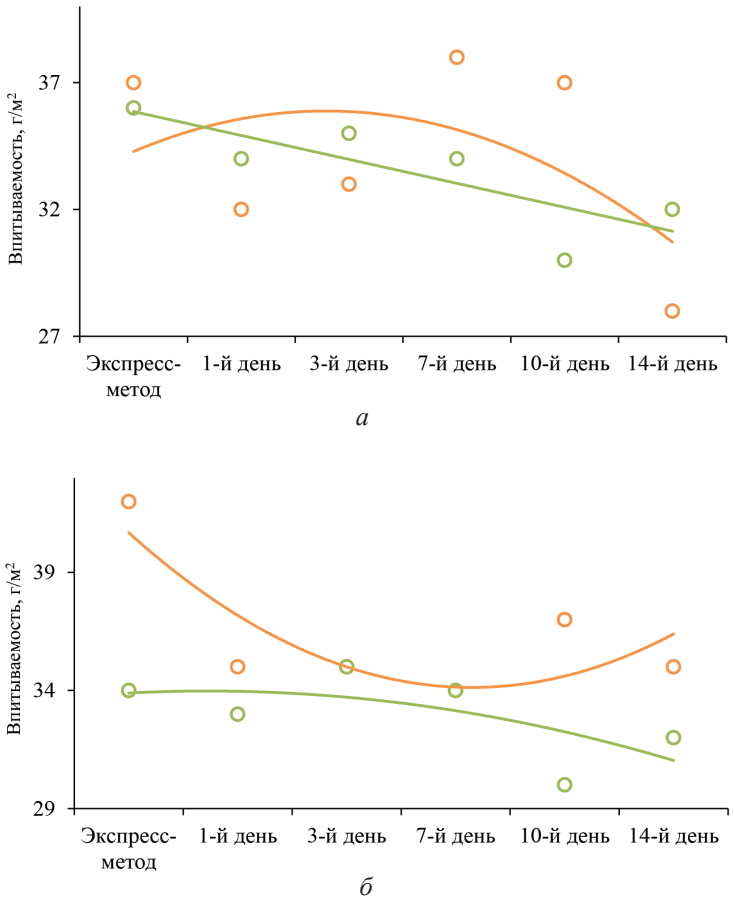


Рис. 2. Впитываемость при одностороннем смачивании образцов флютинга (*а*) и картона-лайнера (*б*) в процессе хранения: – холостой образец; – образец с удерживающими агентами

Fig. 2. The absorbency during one-sided wetting of fluting (*a*) and linerboard (*б*) samples during storage: – blank sample; – sample with retention agents

Таблица 4

Коэффициенты вариации средней впитываемости образцов флютинга и картона-лайнера с использованием и без использования удерживающих агентов, %

The coefficients of variation of the average absorbency of fluting and linerboard samples with and without the use of retention agents, %

Образец	Флютинг	Картон-лайнер
Холостой	10,7	7,8
С удерживающими агентами	5,9	3,5

В целом можно отметить, что после введения в бумажную массу ХВВ для удержания мелкого волокна впитываемость при одностороннем смачива-

нии стала значительно стабильнее. Коэффициент вариации средних значений как для флютинга, так и для картона-лайнера снизился почти в 2 раза.

Выводы

1. Показано, что оптимальными условиями введения ХВВ в бумажную массу является 2-ступенчатая схема подачи крахмала: крахмал – клей АКД – крахмал. Бумажная масса, подготовленная при таком способе дозирования ХВВ, имеет оптимальные электрокинетические показатели, а образцы – стабильность проклейки по Коббу.

2. При использовании удерживающих агентов (фиксирующего агента и флокулянта) процесс созревания клея АКД значительно стабильнее. Это объясняется тем, что бóльшая часть клея фиксируется преимущественно на мелком волокне.

3. Применение удерживающих агентов и 2-ступенчатая схема подачи крахмала (крахмал – клей АКД – крахмал) дополнительно обеспечивают стабильность показателей качества картона, что подтверждается снижением колебаний средних значений почти в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Акулов Б.В., Ермаков С.Г.* Производство бумаги и картона. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2010. 432 с.

Akulov B.V., Ermakov S.G. *Paper and Cardboard Production*. Perm, Perm State Technical University Publ., 2010. 432 p. (In Russ.).

2. *Артемьева А.О., Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А.* Стабилизация проклейки тарного картона // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2023. С. 83–89.

Artemeva A.O., Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dulkin D.A. Stabilization of Container Board Sizing. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials*: Proceedings of the 7th International Scientific and Technical Conference in Memory of Professor V.I. Komarov. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2023, pp. 83–89. (In Russ.).

3. *Блинушова О.И., Дулькин Д.А., Ковернинский И.Н.* Развитие теории механизма проклейки тест-лайнера димерами алкилкетена // Химия растит. сырья. 2008. № 1. С. 131–138.

Blinushova O.I., Dulkin D.A., Koverninskij I.N. Development of the Theory of the Mechanism of Sizing the Test-Liner with Alkyl Ketene Dimmers. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2008, no. 1, pp. 131–138. (In Russ.).

4. *Дернова Е.В., Гораздова В.В., Гурьев А.В., Дулькин Д.А., Дернов А.И., Окулова Е.О.* Практикум по технологии бумаги и картона. Ч. I. Анализ полуфабрикатов, химикатов и бумажной массы. Архангельск: САФУ, 2022. 88 с.

Dernova E.V., Gorazdova V.V., Gur'jev A.V., Dulkin D.A., Dernov A.I., Okulova E.O. *Practical Course on Paper and Cardboard Technology. Part I. Analysis of Semi-Finished Products, Chemicals and Paper Pulp*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2022. 88 p. (In Russ.).

5. *Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И.* Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2007. 1118 с.

Dulkin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I. *Current Status and Prospects for the Use of Recycled Fiber from Waste Paper in the Global and Domestic Paper Industry*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2007. 1118 p. (In Russ.).

6. *Кейзер П.М., Симонова Е.И.* Технология бумаги и картона. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. 92 с.

Kejser P.M., Simonova E.I. *Paper and Cardboard Technology*. St. Petersburg, Higher School of Technology and Energy of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2023. 92 p. (In Russ.).

7. *Хованский В.В., Дубовый В.К., Кейзер П.М.* Применение химических вспомогательных веществ в производстве бумаги и картона. СПб.: СПбГТУРП, 2013. Ч. 2. 70 с.

Khovanskij V.V., Dubovyj V.K., Kejzer P.M. *Application of Chemical Auxiliaries in the Production of Paper and Cardboard*. St. Petersburg, Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 2013, part 2. 70 p. (In Russ.).

8. *Черная Н.В., Флейшер В.Л., Шишаков Е.П., Андрюхова М.В., Мисюров О.А.* Изучение стабильности гидрофобности и прочности опытно-промышленных партий бумаги и картона // Химия и химическая технология переработки растительного сырья: материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В.М. Резникова. Минск: Белорус. гос. технол. ун-т. 2018. С. 160–166.

Chernaya N.V., Flejsher V.L., Shishakov E.P., Andryukhova M.V., Misyurov O.A. Study of Stability, Hydrophobicity and Strength of Pilot-Industrial Batches of Paper and Cardboard. *Chemistry and Chemical Technology for Processing Plant Raw Materials:* Proceedings of the Reports of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of V.M. Reznikov. Minsk, Belarusian State Technological University, 2018, pp. 160–166. (In Russ.).

9. Al-Sabagh A.M., Nasser N.M., El-Hamid T.M.A. Investigation of Kinetic and Rheological Properties for the Demulsification Process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2013, vol. 22, iss. 1, pp. 117–127. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.11.013

10. Brungardt C.L., Cast J.C. Alkenil-Substituted Sizing Agents for Precision Converting Grades of Fine Paper. *TAPPI Papermakers Conference Proceedings*. USA, Philadelphia PA, 1996, pp. 297–308.

11. Chen Q., Ni Y., He Z. Substitution of High-Yield-Pulp for Hardwood Bleached Kraft Pulp in Paper Production and Its Effect on Alkenyl Succinic Anhydride Sizing. *BioResources*, 2012, vol. 7, iss. 2, pp. 1462–1473. https://doi.org/10.15376/biores.7.2.1462-1473

12. Crouse B., Wimer D. Alkaline Sizing: an Overview. *TAPPI Neutral / Alkaline Short Course*, 1990, pp. 5–39.

13. Derkach S.R. Rheology of Emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 151, iss. 1–2, pp. 1–23. https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.07.001

14. Eklund E., Lindstrom T. Water Penetration and Internal Sizing. *Paper Chemistry: An Introduction*. Finland, Grankulla, DT Paper Science Publications, 1991, chapt. 7, pp. 192–222.

15. Esser A., Blum R., Kuhn J., Leduc M. Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Störstofibekämpfung mit Polyvinylaminen. *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 2004, no. 10, pp. 535–539. (In Germ.).

16. Feng G.L., Liu Y.Z., Jiao W.Z., Na-Na Y.U., Wang D.Z. Preparation and Property of Paraffin Wax Emulsion. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2011, iss. 06, pp. 31–34. https://doi.org/10.13218/j.cnki.csdc.2011.06.011

17. Hensema E.R., Welch M.J., Broekhuisen G.J., Bates R. Sizing and Ink Jet Printing of European Multi Purpose Office Paper. *TAPPI Papermakers Conference Proceedings*, 1997.

18. Huang L., Chen C., Gao S., Cui L., Wang S., Song X., Chen F., Liu J., Yu S. Preparation and Characterization of a High Performance Emulsion Using a Polymeric Emulsifier and AKD. *BioResources*, 2018, vol. 13, iss. 2, pp. 4046–4057. https://doi.org/10.15376/biores.13.2.4046-4057

19. Mattson R., Sterte J., Ödberg L. Colloidal Stability of Alkyl Ketene Dimer (AKD) Dispersions. Influence of Shear, Electrolyte Concentration, Poly-electrolytes and Surfactants. *The Science of Papermaking*: Transactions of the XIIth Fundamental Research Symposium. Oxford, 2001, pp. 393–413. https://doi.org/10.15376/frc.2001.1.393

20. Meixner M. New Internal Sizing Technology for Precision Converted Alkaline Finer Paper. *World Pulp&Paper Technology*, 1996/97.

21. Yu L., Garnier G. Mechanism of Internal Sizing with Alkyl Ketene Dimers: the Role of Vapour Deposition. *The Fundamentals of Papermaking Materials*: Transactions of the XIth Fundamental Research Symposium. Cambridge, 1997, pp. 1021–1046. https://doi.org/10.15376/frc.1997.2.1021

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Краткое сообщение
УДК 630*416
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-206-215

Фаутность еловых древостоев северо-таежного района Архангельской области

С.В. Коптев [1,2]✉***, д-р с.-х. наук, доц., гл. науч. сотр.;***
ResearcherID: ABD-5497-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5402-1953
С.А. Васькин[1]***, аспирант;*** *ResearcherID: AHB-7358-2022,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6160-5140
[1]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.koptev@narfu.ru✉, vaskin.s@edu.narfu.ru
[2]Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; s.koptev@narfu.ru✉

Поступила в редакцию 16.10.23 / Одобрена после рецензирования 26.12.23 / Принята к печати 28.12.23

Аннотация. Приведены результаты изучения фаутности ельников в северо-таежном районе Архангельской области. Фаутность оказывает значительное влияние на санитарное состояние, товарность и устойчивость лесных насаждений. Исследование проводилось с 2020 по 2023 г. с использованием материалов, полученных на пробных площадях, заложенных в спелых еловых насаждениях, модальных по основным таксационным параметрам. Перед началом полевых работ были изучены картографические базы данных. Размер пробы определялся изменчивостью таксационного диаметра главной породы и точностью опыта. На каждой пробной площади проводили перечет всех деревьев по породам, диаметру на высоте 1,3 м в коре и по категориям состояния. Для каждого дерева отмечали наличие пороков, влияющих на товарность, плодовых тел дереворазрушающих грибов. Для определения возраста деревьев на пробной площади отбирали керны у шейки корня. Для изучения закономерностей распространения фаутности и получения массового материала были заложены статистические учетные площадки на свежих вырубках. При обнаружении гнили на пне проводили измерение диаметра гнили, определяли ее вид, тип и стадию. Возраст деревьев устанавливали по годичным кольцам на пнях. При наличии гнили возраст определяли по корреляционным связям с диаметром пня. Затем деревья группировали по соответствующим классам возраста. В ходе исследования были изучены и проанализированы показатели фаутности в различных лесорастительных условиях. Выявлено, что с увеличением класса возраста встречаемость всех пороков возрастает. Наиболее явная зависимость зафиксирована для гнилей. Количество гнилей варьирует в диапазоне от 5,1 до 29,0 % в зависимости от типа лесорастительных условий. Доля гнилей снижается с ухудшением лесорастительных условий. Самый распространенный дереворазрушающий гриб – корневая губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.). Отмечается увеличение

© Коптев С.В., Васькин С.А., 2024
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

поражаемости дереворазрушающими грибами деревьев с возрастанием диаметра. Средняя стадия комлевой гнили составила 2,8. Исследование фаутности позволит повысить точность оценки ресурсного потенциала хвойных насаждений Архангельской области.

Ключевые слова: фаутность, еловые насаждения, дереворазрушающие грибы, пороки древесины, гниль

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы: 123022800118-4).

Для цитирования: Коптев С.В., Васькин С.А. Фаутность еловых древостоев северо-таежного района Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 206–215. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-206-215

Brief report

The Defectiveness of Spruce Stands in the Northern Taiga Zone of the Arkhangelsk Region

Sergey V. Koptev[1,2]✉***,*** *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof., Chief Research Scientist; ResearcherID: ABD-5497-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5402-1953*
Sergey A. Vaskin[1]***,*** *Postgraduate Student; ResearcherID: AHB-7358-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6160-5140*
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.koptev@narfu.ru✉, vaskin.s@edu.narfu.ru
[2]Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; s.koptev@narfu.ru✉

Received on October 16, 2023 / Approved after reviewing on December 26, 2023 / Accepted on December 28, 2023

Abstract. The results of studying the defectiveness of spruce forests in the northern taiga zone of the Arkhangelsk Region are presented. Defectiveness has a significant impact on the sanitary condition, marketability and sustainability of forest plantations. The study has been conducted from 2020 to 2023 using materials obtained from sample plots laid in mature spruce plantations, modal in terms of basic taxation parameters. Before starting the field work, the cartographic databases have been studied. The sample size has been determined by the variability of the taxational diameter of the main species and the experiment accuracy. In each test area, all trees have been enumerated by species, diameter at a height of 1.3 m and by condition categories. For each tree, the presence of defects affecting marketability and fruit bodies of wood-destroying fungi has been noted. To determine the age of the trees in the sample plot, core samples have been taken from the root collar. To study the patterns of the defectiveness spread and obtain mass material, statistical survey sites have been laid on fresh cuttings. When rot has been detected on the stump, the diameter of the rot has been measured and its type and stage have been determined. The age of the trees has been determined by the annual rings on the stumps. In the presence of rot, age has been determined by correlation with the diameter of the stump. The trees have then been grouped by their respective age classes.

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

In the course of the research, defectiveness indicators have been studied and analyzed in various forest growth conditions. It has been revealed that with an increase in the age class, the occurrence of all defects increases. The most obvious dependence has been recorded for rots. The amount of rots varies from 5.1 to 29.0 %, depending on the type of forest growth conditions. The proportion of rots decreases with the deterioration of forest conditions. The most common wood-destroying fungus is the root sponge (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.). There is an increase in the incidence of wood-destroying fungi in trees with increasing diameter. The average stage of butt rot has been 2.8. The study of the defectiveness will improve the accuracy of assessing the resource potential of coniferous plantations in the Arkhangelsk Region.
Keywords: defectiveness, spruce plantations, wood-destroying fungi, wood defects, rot
Acknowledgements: The publication was prepared based on the results of the research carried out within the framework of the state assignment of the Federal Budgetary Institution "Northern Research Institute of Forestry" to conduct applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency (topic ID no. 123022800118-4).

For citation: Koptev S.V., Vaskin S.A. The Defectiveness of Spruce Stands in the Northern Taiga Zone of the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 206–215. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-206-215

Введение

Результаты изучения фаутности насаждений отражены во многих публикациях [1–5, 7–10, 21]. П.В. Воропанов отмечает, что с возрастом фаутность деревьев увеличивается: если в разновозрастном насаждении со средним возрастом 170 лет запас фаутной части составляет 15 %, то в насаждении 230 лет он доходит до 27 %. Рост пораженности хвойных пород гнилями с повышением возраста подтверждается и зарубежными исследованиями [24–29]. По данным С.В. Коптева, встречаемость гнилей в черничном и долгомошном ельниках варьирует от 28,6 до 35,3 % [8]. На севере Финляндии зараженность гнилями у ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.) лежит в диапазоне от 16 до 46 % в перестойных насаждениях [27]. Для северных районов Норвегии отмечено, что 25 % ели поражены корневыми гнилями [22, 23]. По данным зарубежных исследователей, гнили ослабляют механическую устойчивость стволов деревьев, что приводит к ветровалам и буреломам. Это можно отнести к вторичным факторам гибели древостоев [24]. Таким образом, возраст и состояние древостоя, а также экологические условия существенно влияют на устойчивость лесных экосистем к болезням и вредителям. На это указывается в различных исследованиях [18–20]. Антропогенные воздействия, такие как загрязнение окружающей среды и рубки, также могут ухудшить состояние лесов и повысить их уязвимость к болезням и вредителям. Отмечается негативное антропогенное влияние на устойчивость рекреационных ельников [11–13]. Потери от заражения деревьев фитовредителями складываются из снижения выхода деловой древесины, текущего древесного прироста в насаждении, уменьшения защитных функций леса [2]. В целом можно сказать, что гибель лесов в старовозрастных еловых древостоях является результатом длительного процесса, включающего воздействие биотических и абиотических факторов. Однако для более комплексного управления лесными ресурсами и защитой лесов от вредных факторов, что может по-

мочь сохранить устойчивость лесов, необходимо проводить дополнительные исследования фаутности.

В северо-таежном районе Архангельской области среди насаждений всех пород самым распространенным типом леса является черничный ельник. Его доля составляет 35 %. Доля долгомошного и сфагнового ельников – 27 % [6, 21]. По данным Лесного плана 2018 г., площадь хвойных лесов Архангельской области сократилась на 2,8 % по сравнению с 2009 г. В то же время средний запас насаждений на землях лесного фонда увеличился на 4 %, что связано с ростом доли спелых и перестойных насаждений [14, 17]. Изучение фаутности в районе, выбранном для исследования, играет важную роль. Фаутность оказывает значительное влияние на санитарное состояние, товарность и устойчивость лесных насаждений. Исследование фаутности позволит повысить точность оценки ресурсного потенциала хвойных насаждений Архангельской области.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в период с 2020 по 2023 г. с использованием материалов, полученных на пробных площадях, заложенных в спелых еловых насаждениях, модальных по основным таксационным параметрам. Основой для подбора пробных площадей стало изучение картографических баз данных. Пробные площади закладывали согласно ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные». Размер пробы зависел от изменчивости таксационного диаметра главной породы и точности опыта.

На каждой пробной площади проводили перечет всех деревьев по породам, диаметру на высоте 1,3 м в коре и по категориям состояния. Для каждого дерева отмечали наличие пороков, влияющих на товарность, плодовых тел дереворазрушающих грибов (ГОСТ 2140–81 «Видимые пороки древесины»). Для определения возраста деревьев на пробной площади отбирали керны у шейки корня буравом Haglof.

Для изучения закономерностей распространения фаутности и получения массового материала были заложены статистические учетные площадки на свежих вырубках. Место закладки пробных площадей подбирали по таксационному описанию с уточнением лесорастительных условий в натуре. Площадки 20×20 м располагали равномерно по площади вырубок. На 50 учетных площадках измеряли диаметр и высоту каждого пня. При обнаружении гнили на пне проводили измерение ее диаметра, определяли вид, тип и стадию гнили. Возраст деревьев устанавливали по годичным кольцам на пнях. При наличии гнили возраст определяли по корреляционным связям с диаметром пня. Затем деревья группировали по классам возраста.

Помимо материалов, полученных авторами, использовались массовые материалы учета фаутности филиала ФБУ «Рослесозащита» «Центр защиты леса Архангельской области» [16].

Результаты исследования и их обсуждение

При изучении фаутности важно установить встречаемость того или иного порока, которая зависит от типа лесорастительных условий. Выявлена зависи-

мость для гнилей. Встречаемость остальных пороков в значительной степени варьирует (рис. 1). Часто пороки фиксируются на деревьях одновременно.

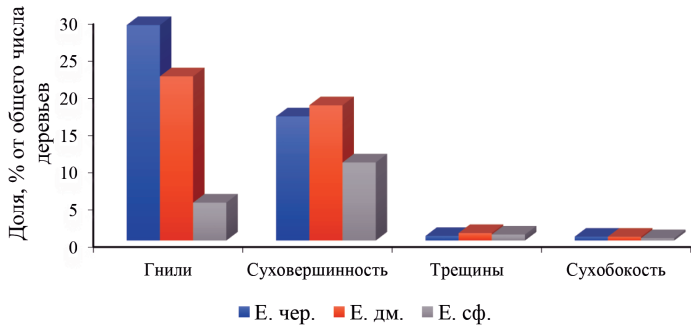


Рис. 1. Встречаемость фаутных деревьев в северотаежных ельниках Архангельской области: черничных (Е. чер.); долгомошных (Е. дм.); сфагновых (Е. сф.)

Fig. 1. The occurrence of defective trees in the northern taiga spruce forests of the Arkhangelsk Region: blueberry (E. чер.); long-moss (E. дм.); sphagnum (E. сф.)

В черничном ельнике встречаемость фаутных деревьев составляет 46,8 % от общего числа деревьев: сухобоких – 0,5 %, с трещинами – 0,6 %, суховершинных – 16,7 %, с гнилями – 29 %. В долгомошном ельнике фаутных деревьев – 41,8 %, из них сухобоких – 0,5 %; с трещинами – 1,0 %; суховершинных – 18,2 %; с гнилями – 22,1 %. В сфагновом ельнике 16,7 % фаутных деревьев: 0,3 % сухобоких, у 0,8 % отмечены трещины, 10,5 % суховершинных, и у 5,1 % есть гнили.

На стволах ели зафиксированы морозные, боковые, несквозные, разошедшиеся трещины. В числе выявленных пороков доля трещин незначительна. Достаточно часто трещины и гниль присутствуют одновременно. Поэтому отдельного влияния на сортность лесоматериалов трещины не оказывают. Наиболее редко в обследованных ельниках встречается сухобокость. Зафиксирована высокая встречаемость суховершинности. Суховершинность часто бывает одновременно с гнилью на сильно ослабленных и усыхающих деревьях. Наиболее вероятной причиной появления суховершинности может быть изменение уровня грунтовых вод под воздействием почвенно-климатических факторов. Самым частотным пороком являются корневые и стволовые гнили деревьев ели. С ухудшением лесорастительных условий на обследованных пробах встречаемость дереворазрушающих грибов снижается.

Согласно нашему исследованию, с увеличением класса возраста встречаемость всех пороков повышается. Наиболее явная зависимость зафиксирована для гнилей. Рост пораженности хвойных пород гнилями с возрастом подтверждается и зарубежными учеными [23, 24, 27]. Сухобокость, трещины зафиксированы с одинаковой частотой для деревьев разного диаметра и класса возраста. Нередко многие пороки присутствуют на деревьях одновременно. Главным из пороков, влияющих на сортность лесоматериалов, являются гнили, вызванные дереворазрушающими грибами. Фаутность северотаежных ельников средняя: количество фаутных деревьев в разных типах лесорастительных условий не превышает 40 %.

Из всех пороков древесины наибольшее влияние на выход сортиментов оказывают гнили, вызванные дереворазрушающими грибами. По нашим данным, самыми часто встречающимися дереворазрушающими грибами ельников северотаежного района Архангельской области являются: корневая губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.), вызывающая коррозионную пеструю ядровую гниль комля; еловая губка (*Phellinus chrysoloma* (Fr.) Donk), становящаяся причиной коррозионной пестрой ситовидной ядровой гнили ствола; трутовик Швейнитца (*Polyporus Schweinitzii* Fr.) – причина деструктивной бурой трещиноватой гнили комля; окаймленный трутовик (*Fomitopsis pinicola* (Sw.Fr.) P. Karst), появление которого на дереве влечет за собой деструктивную бурую трещиноватую ядрово-заболонную гниль.

Видовой состав дереворазрушающих грибов имеет зависимость от лесорастительных условий: с их ухудшением встречаемость дереворазрушающих грибов снижается (рис. 2).

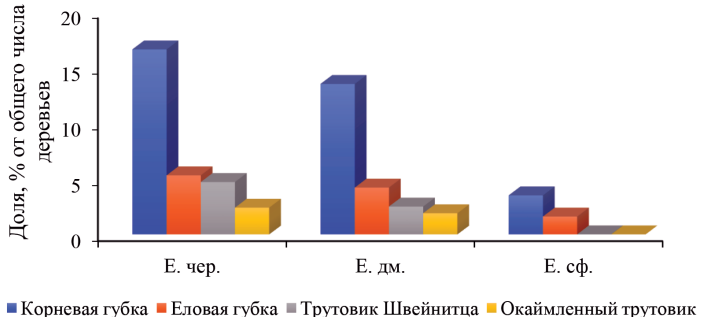


Рис. 2. Видовой состав дереворазрушающих грибов по типам леса

Fig. 2. The species composition of wood-destroying fungi by forest types

В черничном ельнике встречаемость деревьев, пораженных гнилями, составляет 29,0 % от общего числа деревьев (окаймленный трутовик – 2,4 %, трутовик Швейнитца – 4,7 %, еловая губка – 5,3 %, корневая губка – 16,6 %). В долгомошном ельнике деревьев с гнилями – 22,1 % от общего числа (окаймленный трутовик – 1,9 %, трутовик Швейнитца – 2,5 %, еловая губка – 4,2 %, корневая губка – 13,5 %). В сфагновом ельнике доля деревьев с гнилями равняется 5,1 % (еловая губка – 1,6 %, корневая губка – 3,5 %). По нашим данным, наиболее распространенным дереворазрушающим грибом является корневая губка. Доля пораженных ею деревьев варьирует от 3,5 до 16,6 % от общего числа деревьев. Полученные нами данные не противоречат результатам других исследователей [8, 12]. Для развития гнилей наиболее благоприятными являются высокопродуктивные типы леса. Доля корневой губки снижается с ухудшением лесорастительных условий. Вызывая гниение корневой части, трутовик Швейнитца становится причиной ветровалов либо негативно влияет на состояние дерева, что впоследствии приводит к его заселению вредными насекомыми. Еловая губка наносит значительный урон древесине ели, т. к. развивается в ее самых ценных частях. Болезнь влечет почти полную потерю деловой древесины, образование бурелома, реже – ветровала. Окаймленный трутовик часто встречается на ветровальных и буреломных деревьях и в ряде случаев фиксируется на усыхающих и сухостойных.

Исследователями П.В. Воропановым, С.П. Усковым, А.Г. Мошкалевым с соавт. отмечается связь между увеличением встречаемости гнилей и повышением класса возраста [2, 15, 21]. У старовозрастных деревьев фиксируется снижение устойчивости к поражению дереворазрушающими грибами (табл. 1).

Таблица 1

Средняя встречаемость гнилей по классам возраста, % от общего количества деревьев

The average occurrence of rot by age classes, % of the total number of trees

Класс возраста деревьев	Доля деревьев по категориям состояния		Доля деревьев класса возраста
	Здоровые	Поврежденные гнилями	
V	81,0	19,0	20,9
VI	59,6	40,4	34,8
VII	57,1	42,9	6,8
IX	34,1	65,9	27,0
XI	50,0	50,0	3,9
XV	41,2	58,8	6,6
Среднее	53,8	46,2	100*

* Сумма.

В научных работах отмечается увеличение поражаемости дереворазрушающими грибами деревьев с возрастанием диаметра (С.В. Коптев [8], M. Thor et al. [29]). Нами зафиксировано, что диаметр деревьев оказывает сильное влияние на встречаемость гнилей (табл. 2).

Таблица 2

Связь встречаемости гнилей с толщиной деревьев по типам лесорастительных условий

The relationship between the rot occurrence and the tree thickness by types of forest growth conditions

Тип ельника	Уравнение связи	Ошибка уравнения	Пределы изменения независимой переменной, см
Черничный	$y = –0,0230x^2 + 1,8085x – 19,421$	1,81	16…24
Долгомошный	$y = 0,0217\ x^2 – 0,6576x + 7,2374$	2,66	16…28
Сфагновый	$y = –0,0251x^2 + 1,1008x – 10,166$	4,40	16…28

Наиболее часто гнили фиксируются у деревьев со средним диаметром от 20 см и более.

В хвойных древостоях примерно до 80 лет встречаются гнили 1-й и 2-й стадий, а в возрасте до 190 лет – 1, 2, 3 и 4-й стадий [15]. Для всех видов дереворазрушающих грибов в ельниках Европейского Севера характерна средняя степень декомпозиции древесины. Количество выявленных гнилей (коррозионная) на пнях (%) в соответствии со стадией разложения следующее:

1.....22,2
2.....11,2
3.....29,6
4.....37,0

Все выявленные гнили имеют коррозионный тип гниения. Согласно нашим данным, средняя стадия комлевой гнили составила 2,8. Наиболее часто встречаются 3-я и 4-я стадии гнилей. В последней стадии развития болезни обычно участвуют различные виды дереворазрушающих грибов [8].

Заключение

В ходе проведения исследования были изучены показатели фаутности в различных лесорастительных условиях в северо-таежном районе Архангельской области. Выявлено, что с увеличением класса возраста встречаемость всех пороков повышается. Наиболее явная зависимость зафиксирована для гнилей. Количество гнилей варьирует от 5,1 до 29,0 % в зависимости от типа лесорастительных условий. Доля гнилей снижается с ухудшением лесорастительных условий. Самым распространенным дереворазрушающим грибом является корневая губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.). Отмечается увеличение поражаемости дереворазрушающими грибами деревьев с возрастанием диаметра. Средняя стадия комлевой гнили составила 2,8. Наиболее часто встречаются 3-я и 4-я стадии гнилей.

Пороки древесных стволов уменьшают выход деловой древесины и сортность лесоматериалов. Правильный учет фаутности необходим для рационализации использования лесного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Алексеев И.А., Курненкова И.П.* Учет фаутности ели и пихты при товаризации лесосечного фонда в Лысьвенском лесхозе Пермской области // Проблемы использования, воспроизводства и охраны лесных ресурсов: материалы респ. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола: Марийск. кн. изд-во, 1989. Кн. 2. С. 115–116.

Alekseev I.A., Kurnenkova I.P. Accounting for the Spruce and Fir Defectiveness in the Merchantable Structure Evaluation of the Logging Fund in the Lysvensky Forestry of the Perm Region. *Problems of Use, Reproduction and Protection of Forest Resources*: Materials of the Republican Scientific and Practical Conference. Yoshkar-Ola, Mari Publ. House, 1989, book 2, pp. 115–116. (In Russ.).

2. *Воропанов П.В.* Ельники Севера. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. 180 с.

Voropanov P.V. *Spruce Forests of the North.* Moscow, Leningrad Goslesbumizdat Publ., 1950. 180 p. (In Russ.).

3. *Горшин С.Н.* Зараженность, фаутность и качественная производительность елово-пихтовых насаждений // Изв. Казан. лесотехн. ин-та. 1931. Вып. 2–3. С. 1–41.

Gorshin S.N. Infestation, Defectiveness and Quality Productivity of Spruce and Fir Plantations. *Izvestiya Kazanskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1931, iss. 2–3, pp. 1–41. (In Russ.).

4. *Гусев И.И.* Продуктивность ельников Севера. Л.: ЛГУ, 1978. 232 с.

Gusev I.I. *Productivity of the Spruce Forests of the North*. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1978. 232 p. (In Russ.).

5. *Гусев И.И.* Закономерности формирования естественного отпада в таежных ельниках // Изв. вузов. Лесн. журн. 1989. № 4. С. 3–5.

Gusev I.I. Patterns of Mortality in Taiga Spruce Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1989, no. 4, pp. 3–5. (In Russ.).

6. *Ильинцев А.С., Шамонтьев И.Г., Третьяков С.В.* Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области) // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 3(43). С. 45–62.

Ilintsev A.S., Shamontev I.G., Tretyakov S.V. Modern Dynamics of Forest Use in the Boreal Forests of Russia (for Example of the Arkhangelsk Region). *Lesotekhnicheskij Zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2021, vol. 11, no. 3(43), pp. 45–62. (In Russ.). https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/4

7. *Коптев С.В.* Закономерности распространения гнилей в северо-таежных ельниках // Вопросы рационального использования природных, сырьевых и энергетического ресурсов Европейского Севера: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов, аспирантов и преподавателей. Архангельск, 1991. С. 18.

Koptev S.V. Patterns of Rot Spread in the North Taiga Spruce Forests. *Issues of Rational Use of Natural, Raw Materials and Energy Resources of the European North*: Scientific and Technical Conference of Young Specialists, Postraduate Students and Teachers: Abstracts. Arkhangelsk, 1991, p. 18. (In Russ.).

8. *Коптев С.В.* Фаутность северотаежных ельников // Изв. вузов. Лесн. журн. 1992. № 2. С. 20–26.

Koptev S.V. Defectiveness of the North Taiga Spruce Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1992, no. 2, pp. 20–26. (In Russ.).

9. *Коптев С.В.* Закономерности формирования товарной структуры в усыхающих ельниках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 5. С. 42–49.

Koptev S.V. Regularities of the Commodity Structure Formation in Shrinking Spruce Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 5, pp. 42–49. (In Russ.).

10. *Коптев С.В., Ежов О.Н.* Товарность фаутных деревьев сосны // Лесоведение. 2005. № 3. С. 76–80.

Koptev S.V., Ezhov O.N. Marketability of Doty Pine Trees. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2005, no. 3, pp. 76–80. (In Russ.).

11. *Лебедев А.В.* Патогенные грибы в рекреационных ельниках и диагностика устойчивости деревьев // Проблемы лесоведения и лесной экологии: тез. докл. Ч. II. М., 1990. С. 526–527.

Lebedev A.V. Pathogenic Fungi in Recreational Spruce Forests and Diagnostics of Tree Stability. *Problems of Forestry and Forest Ecology*: Abstracts. Part 2. Moscow, 1990, pp. 526–527. (In Russ.).

12. *Лебедев А.В.* Еловая губка в антропогенных древостоях и диагностика поражения деревьев // Изв. вузов. Лесн. журн. 1995. № 2–3. С. 38–42.

Lebedev A.V. Spruce Sponge in Anthropogenic Forest Stands and Diagnosis of Tree Damage. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1995, no. 2–3, pp. 38–42. (In Russ.).

13. *Лебедев А.В.* Корневая губка в рекреационных ельниках и диагностика поражения деревьев // Изв. вузов. Лесн. журн. 1998. № 4. С. 29–34.

Lebedev A.V. Root Sponge in Recreational Spruce Forests and Diagnostics of Tree Damage. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1998, no. 4, pp. 29–34. (In Russ.).

14. Лесной план Архангельской области Российской Федерации на 2019–2028 годы. Архангельск, 2018. 233 с.

Forest Plan of the Arkhangelsk Region of the Russian Federation for 2019–2028. Arkhangelsk, 2018. 233 p. (In Russ.).

15. *Мошкалев А.Г., Книзе А.А., Ксеновонтов Н.И., Уланов Н.С.* Таксация товарной структуры древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1982. С. 158.

Moshkalev A.G., Knize A.A., Ksenovontov N.I., Ulanov N.S. *Taxation of the Commodity Structure of Forest Stands*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982, p. 158. (In Russ.).

16. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Архангельской области за 2020 год и прогноз на 2021 год. Архангельск, 2021. 128 с.

Review of the Sanitary and Forest Pathology Status of the Forests of the Arkhangelsk Region for 2020 and Forecast for 2021. Arkhangelsk, 2021. 128 p. (In Russ.).

17. Официальный сайт администрации Архангельской области. Режим доступа: http://dvinaland.ru/region/Arkhangelsk_obl/ (дата обращения: 13.11.24).

The Official Website of the Arkhangelsk Region Administration. Available at: http://dvinaland.ru/region/Arkhangelsk_obl/ (accessed 13.11.24). (In Russ.).

18. *Стороженко В.Г.* Особенности гнилевого поражения ельников различного происхождения // Изв. вузов. Лесн. журн. 1992. № 3. С. 113–116.

Storozhenko V.G. Features of Rot Damage to Spruce Forests of Various Origin. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1992, no. 3, pp. 113–116. (In Russ.).

19. *Стороженко В.Г.* Участие дереворазрушающих грибов в процессах деструкции и формирования лесных сообществ // Хвойные бореал. зоны. 2016. Т. XXXIV, № 1–2. С. 87–91.

Storozhenko V.G. Participation of Wood-Destroying Fungi in the Processes of Destruction and Formation of Forest Communities. *Khvoinye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2016, vol. XXXIV, no. 1–2, pp. 87–91. (In Russ.).

20. *Стороженко В.Г., Засадная В.А.* Структура древесного отпада девственных ельников северной и южной тайги Европейской части России // Сиб. лесн. журн. 2019. № 2. С. 64–73.

Storozhenko V.G., Zasadnaya V.A. Structure of Woody Debris of Virgin Spruce Forests of the Northern and Southern Taiga in the European Part of Russia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2019, no. 2, pp. 64–73. https://doi.org/10.15372/SJFS20190206

21. *Усков С.П.* Фаутность спелых и перестойных ельников Кадниковского лесничества // Тр. Ин-та леса и древесины. 1962. Т. 53. С. 212.

Uskov S.P. Defectiveness of Mature and Overmature Spruce Forests of the Kadnikovsky Forestry. *Proceedings of the Forest and Timber Institute: Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences*, 1962, vol. 53, p. 212. (In Russ.).

22. Huse K., Solheim H., Venn K. Råte i Gran Registrert på Stubber Etter Hogst Vinteren 1992. *Rapp Skogforsk*, 1994, vol. 23, no. 94, pp. 1–26. (In Norw.).

23. Hylen G., Granhus A. A Probability Model for Root and Butt Rot in *Picea abies* Derived from Norwegian National Forest Inventory Data. *Scandinavian Journal of Forest Resesearch*, 2018, vol. 33, iss. 7, pp. 657–667. https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1487074

24. Mattila U., Nuutinen T. Assessing the Incidence of Butt Rot in Norway Spruce in Southern Finland. *Silva Fennica,* 2007, vol. 41, no. 1, art. no. 473. https://doi.org/10.14214/sf.473

25. Möykkynen T., Pukkala T. Optimizing the Management of a Norway Spruce Stand on a Site Infected by *Heterobasidion* coll. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, iss. 2, pp. 149–159. https://doi.org/10.1080/02827580902870508

26. Müller M.M., Kaitera J., Henttonen H.M. Butt Rot Incidence in the Northernmost Distribution Area of Heterobasidion in Finland. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 425, pp. 154–163. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.036

27. Norokorpi Y. Old Norway Spruce Stands, Amount of Decay and Decay-Causing Microbes in Northern Finland. *Communications Instituti Forestalis Fenniae*, 1979, vol. 97, no. 6, ref. 103.

28. Stenlid J., Wästerlund I. Estimating the Frequency of Stem Rot in *Picea abies* Using an Increment Borer. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1986, vol. 1, iss. 1-4, pp. 303–308. https://doi.org/10.1080/02827588609382421

29. Thor M., Ståhl G., Stenlid J. Modelling Root Rot Incidence in Sweden Using Tree, Site and Stand Variables. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 20, iss. 2, pp. 165–176. https://doi.org/10.1080/02827580510008347

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 2024 г.

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Dyomina E.B., Savchenkova V.A. The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow). № 4-37

Kadlec J., Novosadová K., Palovčíková D., Tomšovský M., Kománek M., Pokorný R. First Experience of Paulownia Bellissia® Cultivation in an Agroforestry System in the Czech Republic. № 3-9

Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Raevsky B.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Double-Cropping *of Pinus sylvestris* L. Containerized Seedlings under Short Growing Season Conditions at High Latitudes. № 6-50

Savchenkova V.A., Vasiliev S.B., Aksenov P.A., Nikitin V.F. Features of Restoration of Coniferous-Broad-Leaved Forests. № 6-133

Umarov M.U., Chavchavadze E.S., Shchekalev R.V., Romanova V.O., Umarov R.M. Variability of Anatomical Characteristics of the Wood of Mountain Ash (*Sorbus aucuparia* L.) in the Conditions of the North Caucasus. № 6-78

Алексеев А.С., Черниховский Д.М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований. № 2-11

Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П., Попкова И.А. Концептуальная модель интродукции дендрофлоры в северных широтах Русской равнины. № 6-66

Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Храмов Р.Н., Бабич Н.А., Мелехов В.И. Синтетические укрытия вегетационных сооружений с интегрированным фотолюминофором в укоренении черенков туи западной. № 2-29

Болданова Е.В. Точка росы как основа оперативного показателя лесопожарной опасности. № 1-114

Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Гришлова М.В. Географическая изменчивость показателей роста и репродуктивного развития сосны кедровой сибирской. № 6-9

Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Андронова А.А. Динамика биометрических и углеродных показателей сосновых насаждений на залежных землях Красноярской лесостепи. № 6-35

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Татаринова Т.Д. Жирнокислотный состав и активность ацил-липидных десатураз в почках березы повислой в зимне-весенний период в Карелии и Якутии. № 6-90

Выводцев Н.В. Ресурсный потенциал бархата амурского в Приамурско-Приморском хвойно-широколиственном районе. № 4-26

Дерюгин А.А., Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б. Модель формирования березово-еловых насаждений в условиях южной тайги Русской равнины. № 3-23

Иванов В.В., Борисов А.Н., Шапченкова О.А., Петренко А.Е. Особенности роста сосны обыкновенной в условиях Красноярской лесостепи. № 5-40

Иванова Н.С., Фомин В.В., Залесов С.В., Михайлович А.П. Сравнительный анализ эколого-флористической классификации и лесных типологий России. № 4-49

Ильинцев А.С., Романов Е.М., Воронин В.В., Богданов А.П. Современная практика искусственного лесовосстановления в таежной зоне европейской части России. № 1-52

Камалова И.И., Петюренко М.Ю., Дегтярева А.П., Кузнецова Н.Ф., Внукова Н.И. Особенности генетической структуры популяции *Pinus sylvestris* L. в степной зоне Европейской России. № 2-49

Капица Е.А., Шорохова М.А., Моргун Е.В., Корепин А.А., Шорохова Е.В. Крупные древесные остатки в коренных и вторичных среднетаежных ельниках. № 3-92

Карабан А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А., Цветков И.В. Возрастная динамика биомассы ольхи серой в древостоях Архангельской области. № 2-65

Киселева Е.Н., Раченко М.А., Раченко А.М., Мокшонова И.М. Укореняемость черенков хвойных видов дендрофлоры Прибайкалья. № 5-27

Кириенко М.А., Скрипальщикова Л.Н., Гончарова И.А. Состояние арборифлоры парка «Гвардейский» г. Красноярска. № 6-20

Клименко О.Е., Клименко Н.И. Влияние насаждений *Quercus robur* L. и *Juglans rupestris* Engelm. на свойства степных почв. № 5-91

Коба В.П., Крестьянишин И.А., Коренькова О.О. Семенная продуктивность и качество семян *Pinus sylvestris* L. в лесных культурах на крымских ялах. № 4-68

Коновалов В.Ф., Габитова А.А., Габделхаков А.К., Рафикова Д.А., Ханова Э.Р. Фенотипическая оценка клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесостепной зоне Башкирского Предуралья. № 4-9

Лаур Н.В., Царев А.П., Царев В.А., Царева Р.П. Архивы клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Республике Карелия. № 2-76

Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Фотосинтез, минеральное питание и продуктивность лиственных и хвойных видов дендрофлоры центральной части Русской равнины. № 4-81

Лысиков А.Б., Мельник П.Г., Мерзленко М.Д., Колесников А.В. Изменения дерново-подзолистой почвы в лесных культурах лиственницы европейской за длительный период. № 2-90

Макаров В.П., Зима Ю.В. Концентрация химических элементов в хвое *Larix gmelinii* и листьях *Betula pendula.* № 5-76

Мамедалиева В.М., Гейдарзаде Г.С. Влияние аэрозолей на лесорастительный покров в юго-западном регионе Азербайджана. № 3-130

Моллаева М.З., Темботова Ф.А. Морфологическая изменчивость ассимиляционного аппарата *Pinus sylvestris* L. в пределах Тебердинского национального парка. № 1-91

Морозова Г.Ю. Жизнеспособность растений в условиях урбанизированной среды. № 6-106

Осипенко А.Е., Залесов С.В. Формирование морфологии деревьев культивируемых сосновых древостоев. № 2-105

Остроухов А.В. Применение методов пространственного анализа при оценке степени горимости лесов Хабаровского края. № 4-106

Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Цветков И.В., Цепордей И.С. Обобщенные модели фитомассы деревьев ивы (род *Salix* L.): мета-анализ. № 5-64

Придача В.Б., Пеккоев А.Н., Неронова Я.А. Особенности роста и структуры древесины сосны на вы-

рубке и под пологом древостоя в условиях Республики Карелии. № 4-92

Румянцев Д.Е., Воробьева Н.С. Дендроэкологическое исследование роста осины в условиях Московской области. № 3-46

Седаева М.И., Экарт А.К., Кравченко А.Н. Репродуктивные показатели липы Нащокина (*Tilia nasczokinii* Stepanov). № 1-65

Семенякин Д.А., Тихонова И.В. Использование многофакторного анализа данных в оценке состояния предварительного и последующего возобновления сосняков после выборочных рубок. № 1-33

Сенькина С.Н. Водообмен в хвойных фитоценозах под влиянием климатических изменений. № 3-107

Соболев А.Н., Феклистов П.А., Болотов И.Н., Макаров С.С., Тюкавина О.Н., Бруева Ж.А. Особенности структуры черничных ельников Большого Соловецкого острова. № 6-121

Сунгурова Н.Р., Лебедева О.П., Страздаускене С.Р. Адаптивный потенциал видов рода *Spiraea* L. в условиях Дендрологического сада им. И.М. Стратоновича. № 1-77

Тарасов С.И., Герлинг Н.В. Игловидные листовые органы хвойных. Часть I. Моделирование периметра поперечного сечения иглы. № 3-73

Тарасов С.И., Герлинг Н.В. Игловидные листовые органы хвойных. Часть II. Моделирование площади поверхности иглы. № 5-51

Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Адаптация *Pinus sylvestris* с разным цветом семян на избыточно увлажненных почвах. № 5-9

Терехов Г.Г., Андреева Е.М., Стеценко С.К. Выращивание культур кедра сибирского в условиях повреждаемости дикими животными. № 1-101

Тишкина Е.А., Семкина Л.А., Шевелина И.В. Формирование вторичного ареала *Caragana arborescens* Lam. в лесопарках г. Екатеринбурга. № 5-109

Федорков А.Л. Лесная селекция и генетическое разнообразие древесных пород. № 1-23

Феклистов П.А., Тюкавина О.Н., Сунгурова Н.Р., Макаров С.С., Болотов И.Н., Тарханов С.Н. Особенности накопления минеральных элементов и азота в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной. № 3-118

Чеканышкин А.С. Рост и состояние дуба черешчатого в смешанных древостоях полезащитных лесных полос. № 3-65

Шевелев С.Л., Усов С.В., Романова Л.И. Оценка секвестрационного потенциала осиново-березовых древостоев островных лесостепей Средней Сибири. № 1-9

Шхапацев А.К., Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Солдатов В.П., Федоренко А.Н., Вилкова В.В. Биологическая активность горных почв Западного Кавказа после сведения леса. № 5-119

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

Никонов В.О., Посметьев В.И., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Сизьмин И.В. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного дышла лесовозного автопоезда. № 2-128

Петухов И.В., Иванов К.О., Ворожцов Д.М., Роженцов А.А., Роженцова Н.И., Стешина Л.А. Сегментация перекрывающихся изображений деревьев на цифровых снимках лесных массивов. № 1-126

Посыпанов С.В., Козлов К.В. Теоретическое обоснование держащей силы мобильной опоры для крепления лесосплавных объектов. № 1-141

Чудинов С.А. Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. № 2-118

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Смертин Н.В. Древесно-композитные плиты с низким коэффициентом линейного теплового расширения. № 2-142

Каптелкин А.А., Куликова Н.В., Рыкунин С.Н. Повышение выхода пиломатериалов при распиловке с брусовкой. № 1-152

Мартынов В.А., Лисятников М.С., Лукина А.В., Рощина С.И. Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях. № 1-168

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Bandara V., Alwis A., Bandara T., Muthumala C., Marikar F. Assessment of the Boron Treatability Level of Lesser-Known Timber Species by the Impregnation Method. № 6-160

Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н., Гнусов М.А. Имитационная модель дисковой лесопосадочной машины. № 4-119

Зарипов Ш.Г., Пунтусова Ю.С. Экологические особенности конвективной сушки пиломатериалов. № 3-166

Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции. № 3-140

Клевеко В.И. Моделирование теплового режима дорожной одежды и земляного полотна лесовозных дорог. № 5-133

Ладейщиков К.В., Чудинов С.А. Особенности эксплуатации лесовозных дорог в весенне-зимний период. № 4-134

Мелехов В.И., Соловьев И.И., Сазанова Е.В., Пономарева Н.Г. Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно. № 6-175

Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Казаков И.В. Моделирование поворотного механизма гидроманипулятора лесовозного автомобиля. № 5-143

Посыпанов С.В., Козлов К.В. Инженерный расчет гибких оболочек лесосплавных опор. № 5-159

Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера. № 3-153

Хитров Е.Г., Должиков И.С., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Болотин Д.В., Андронов А.В. Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов. № 6-147

Эскин В.Д., Ермолин В.Н., Криворотова А.И. Конструкционные плиты из гидродинамически активированной коры сосны (*Pinus sylvestris*) без связующих веществ. № 5-175

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Анискин С.В., Куров В.С. Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства. № 1-182

Анискин С.В., Куров В.С. Эффект интенсивного окисления сероводорода дымовых газов содорегенерационного котла при производстве целлюлозы. № 5-188

Бровко О.С., Нечаева М.Е., Ивахнов А.Д., Паламарчук И.А., Горшкова Н.А., Богданович Н.И. Аэрогели

на основе диоксида кремния и лигносульфоната. № 6-184

Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А. Стабилизация проклейки макулатурного тарного картона в процессе хранения. № 6-195

Королева Т.А., Медведев В.В., Помелов Ю.В. Результаты исследования взаимосвязи вязкости и механической прочности беленой лиственной сульфатной целлюлозы. № 5-203

Мидуков Н.П., Евдокимов Н.В., Куров В.С., Коршунов В.В. Удельные энергетические затраты на измельчение древесины при подготовке композита для 3D-печати. № 4-159

Прокопьев А.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя. № 4-147

Сафина А.В., Зиатдинова Д.Ф., Назипова Л.Р., Сафин Р.Г., Валеев К.В. Инженерная методика расчета установки извлечения бетулина из бересты березы. № 1-195

Тарабукин Д.В., Патова Е.Н., Новаковская И.В. Перспективы глубокой переработки бумажного шлама с применением ферментов, микроводорослей и дрожжей. № 2-166

Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Плахин В.А., Скрипников Е.А., Овчинников Д.В. Нитрозирование лигносульфонатов в условиях твердофазного катализа. № 3-175

Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Хакимов Р.Р., Фонарёв И.И. Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов. № 3-188

Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Слизикова Е.А., Каплёв Е.В., Пожаркова С.А. Влияние вида ножевой размалывающей гарнитуры на процесс получения микрокристаллической целлюлозы. № 2-152

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Moazami V., Esbouei A.Ya., Hatefnia H. Surface Treatment of Fiberboard Wood Pulp Mat with Dispersed Water (by the Example of Arian Sina MDF Company). № 4-177

Антонов А.М., Чудецкий А.И., Черятова Ю.С., Кузнецова И.Б., Куликова Е.И. Совершенствование технологического цикла клонального микроразмножения *Rubus chamaemorus* L. № 5-214

Беляков Д.В., Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Грибов С.Е. Сохранение видового разнообразия растений при лесопользовании в ключевых биотопах Вологодской области. № 2-189

Гончарова О.А., Зотова О.Е. *Pinus sibirica* Du Tour в условиях интродукции на примере Полярно-альпийского ботанического сада-института. № 2-178

Зырянов М.А., Медведев С.О., Мохирев А.П. Повышение ресурсного потенциала древесного сырья. № 4-193

Коптев С.В., Васькин С.А. Фаутность еловых древостоев северо-таежного района Архангельской области. № 6-206

Примаков Н.В., Танюкевич В.В. Лесохозяйственные мероприятия в полезащитных лесных полосах Краснодарского края. № 4-185

Стороженко В.Г. Структурные особенности коренных сосняков северной и средней тайги при пирогенных воздействиях. № 3-203

Чернов В.Ю., Гайсин И.Г., Носова А.Н., Мальцева Е.М. Водопоглощение термически модифицированного древесного заполнителя термодревесно-цементной композиции. № 2-201